



## **PROYECTO FINAL DE CARRERA**

# **ESTUDIO DE LA LÍNEA ALTA TENSIÓN SET ALMAZÁN- SET SORIA**



*M<sup>a</sup> Carmen De La Hoz Palacios*

*Ingeniería Técnica Industrial: Electricidad*

*Universidad de Zaragoza. Curso 2009-2010*

## INDICE

1. OBJETO DEL PROYECTO. ....	4
2. NORMATIVA DE APLICACION.....	4
3. JUSTIFICACION DEL PROYECTO. ....	4
4. DESCRIPCION DEL ENTORNO DEL EMPLAZAMIENTO. ....	6
5. CARACTERISTICAS DE LA LINEA. ....	10
5.1. CONDUCTOR. ....	12
5.2. AISLAMIENTO.....	14
5.3. HERRAJES Y GRAPAS. ....	16
5.4. APOYOS.....	18
6. PARAMETROS ELECTRICOS DE LA LINEA ELECTRICA.....	19
6.1. CONSTANTES CARACTERISTICAS DE LA LINEA.....	20
6.1.1 RESISTENCIA ELECTRICA.....	20
6.1.2 COEFICIENTE DE AUTOINDUCCION. ....	22
6.1.3 CAPACIDAD.....	26
6.1.4 PERDIDAS EN UNA LÍNEA.....	27
6.2. CARACTERISTICAS ELECTRICAS. ....	32
6.2.1 RESISTENCIA ELECTRICA.....	32
6.2.2 REACTANCIA DE AUTOINDUCCION. ....	32
6.2.3 SUCEPTANCIA. ....	33
6.2.4 IMPEDANCIA.....	34
6.2.5 ADMITANCIA.....	34
6.3. IMPEDANCIA Y POTENCIA CARACTERISTICA. ....	35
6.3.1 IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA. ....	35
6.3.2 POTENCIA CARACTERISTICA. ....	36
6.4. RESUMEN DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS. ....	37

6.5. METODO DEL MOMENTO ELECTRICO.....	38
7. CALCULO MECANICO DE CABLES. ....	49
7.1. CALCULO MECANICO PARA EL VANO MEDIO. ....	54
7.2. CALCULO MECANICO PARA EL VANO MAXIMO.....	60
7.3. CALCULO MECANICO PARA EL VANO MINIMO.....	64
7.4. RESUMEN DE LAS MAGNITUDES CALCULADAS. ....	68
8. DISTANCIAS MINIMAS DE SEGURIDAD. ....	70
8.1. DISTANCIAS DE LOS CONDUCTORES AL TERRENO.....	70
8.2. DISTANCIAS ENTRE CONDUCTORES.....	70
8.3. DISTANCIAS A TIERRA.....	72
9. GLOSARIO.....	73
10. BIBLIOGRAFIA.....	76

## **1. OBJETO DEL PROYECTO**

El presente Documento tiene por objeto describir y analizar las características más significativas, desde el punto de vista eléctrico y mecánico, de la línea eléctrica de 132 kV, situada en la provincia de Soria, que va desde la Subestación de Seccionamiento de Almazán de Red Eléctrica de España, S.A. hasta la Subestación de Distribución de Soria, construida por IBERDROLA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA, S.A.U.

## **2. NORMATIVA DE APLICACIÓN**

En la redacción se han tenido en cuenta todas y cada una de las especificaciones contenidas en el Reglamento Técnico de Líneas Eléctricas de Alta Tensión (RLAT), aprobado por Decreto 223/2008, de 15 de febrero, y publicado en el B.O.E. el 19 de marzo de 2008.

Asimismo se ha tenido en cuenta lo establecido en las normas UNE correspondientes y Normas IBERDROLA.

## **3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

Las líneas eléctricas constituyen uno de los principales elementos que intervienen en la composición de una red eléctrica. La interconexión de sistemas, el transporte, reparto y distribución de la energía dentro de un sistema determinado, se realizan por medio de líneas aéreas o subterráneas.

La interconexión entre redes regionales o nacionales, así como el transporte entre grandes centros de producción y consumo, para los que siempre se emplean altas tensiones con distancias de orden elevado, son dominio exclusivo de las líneas aéreas.

Cuando se trata de redes rurales, provinciales, o cuando las distancias superan algunos kilómetros, predominan las líneas aéreas. Cuando se trata de centros urbanos, zonas industriales densas o distancias muy cortas, es práctica normal utilizar las líneas subterráneas.

Para densidades de carga pequeñas y medias, el sistema normalmente utilizado es el aéreo. Para grandes densidades de carga en las aéreas congestionadas de las ciudades es normal utilizar el sistema subterráneo mediante cables enterrados a lo largo de las calles.

Una línea eléctrica aérea deberá ser diseñada y construida de forma tal que durante su vida prevista:

- a) Desempeñe su propósito bajo un conjunto de condiciones definidas, con niveles aceptables de fiabilidad y de manera económica.
- b) No sea susceptible de un colapso progresivo (cascada) si sucede un fallo en un componente específico.
- c) No sea susceptible de causar daños humanos o pérdida de vidas durante su construcción, explotación y mantenimiento.

Al diseñarse una línea eléctrica aérea debe limitarse su impacto en el medio ambiente. Igualmente se considerarán las disposiciones legales que le afecten a cada Comunidad Autónoma, en nuestro caso la Comunidad de Castilla y León. Asimismo, debe considerarse la seguridad de las personas y de los animales, tanto de la avifauna como del ganado.

La vida útil es el periodo de funcionamiento previsto de la línea, para su propósito prefijado con las operaciones normales de mantenimiento, pero sin que sean necesarias reparaciones substanciales, la vida útil de las líneas aéreas se considera que es, generalmente, de 40 años.

Estos requisitos expuestos, están basados en las consideraciones que se indican en la Norma UNE-EN 50341-1 “Norma básica aplicable a líneas eléctricas aéreas de tensiones superiores a 45 kV”

El sistema aéreo de distribución tiene una vida útil menor que un sistema enterrado esto puede ser porque el sistema aéreo es más propenso a sufrir mayor número de averías como consecuencia del viento, hielo, nieve o accidentes de todo tipo, sin embargo conviene no olvidar que la reparación y localización de averías es mucho más sencilla en un sistema aéreo que en un sistema subterráneo.

Los elementos que constituyen parte de las líneas aéreas aparecen reflejados en el RLAT y son los siguientes:

- Conductores
- Herrajes
- Aisladores
- Apoyos

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DEL EMPLAZAMIENTO

Para conocer el posible efecto sobre el territorio de la línea eléctrica analizada, se ha definido un área de estudio lo suficientemente amplia como para englobar las ubicaciones de los apoyos y demás elementos de la línea eléctrica, así como su área de influencia. Las imágenes siguiente muestran donde está localizada la línea a estudiar.

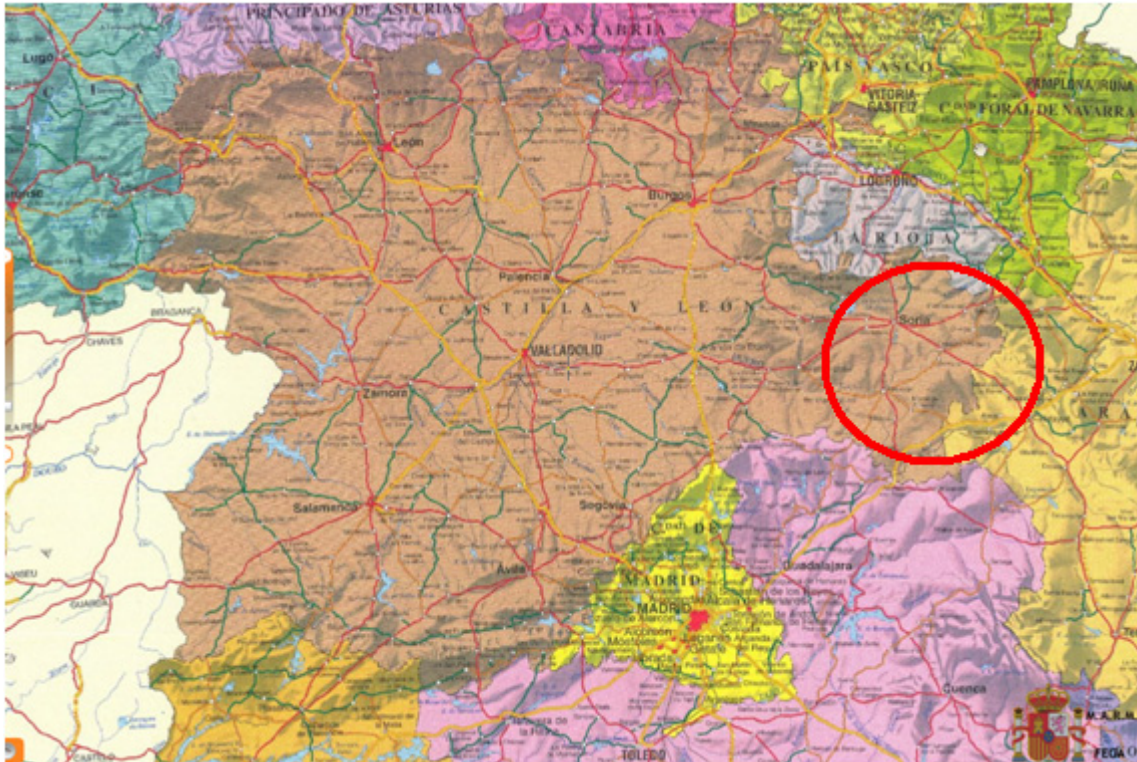


FIGURA 1: IMAGEN DE LA COMUNIDAD DE CASTILLA Y LEÓN.

Tiene su ubicación en la comunidad de Castilla y León, en la provincia de Soria, concretamente abarca los terrenos de los términos municipales de Almazán, Coscurita (Bordejé), Borjabad, Cubo de la Solana, Los Rábanos, Golmayo y Soria. Es una zona donde predominan pequeños desniveles, pasando varias veces por ríos, como es el caso del río Duero o el río Golmayo y por carreteras, tanto por sendas como por autovías, como es el caso de la A-15.



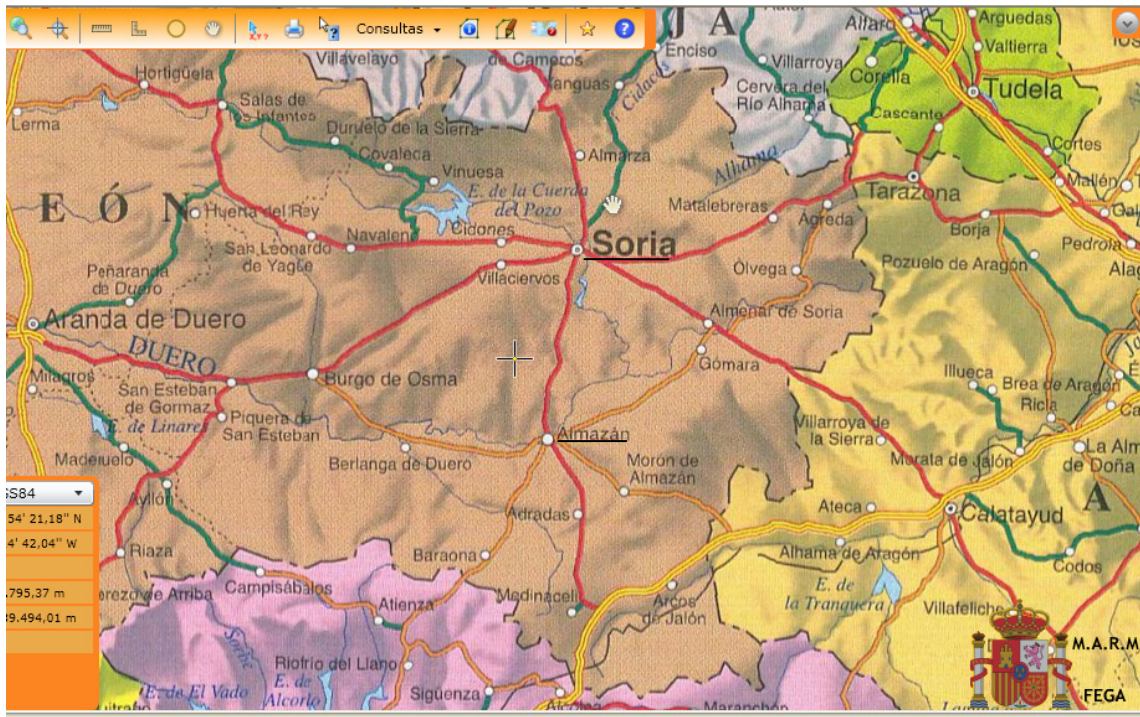


FIGURA 2: IMAGEN DE LA PROVINCIA DE SORIA.

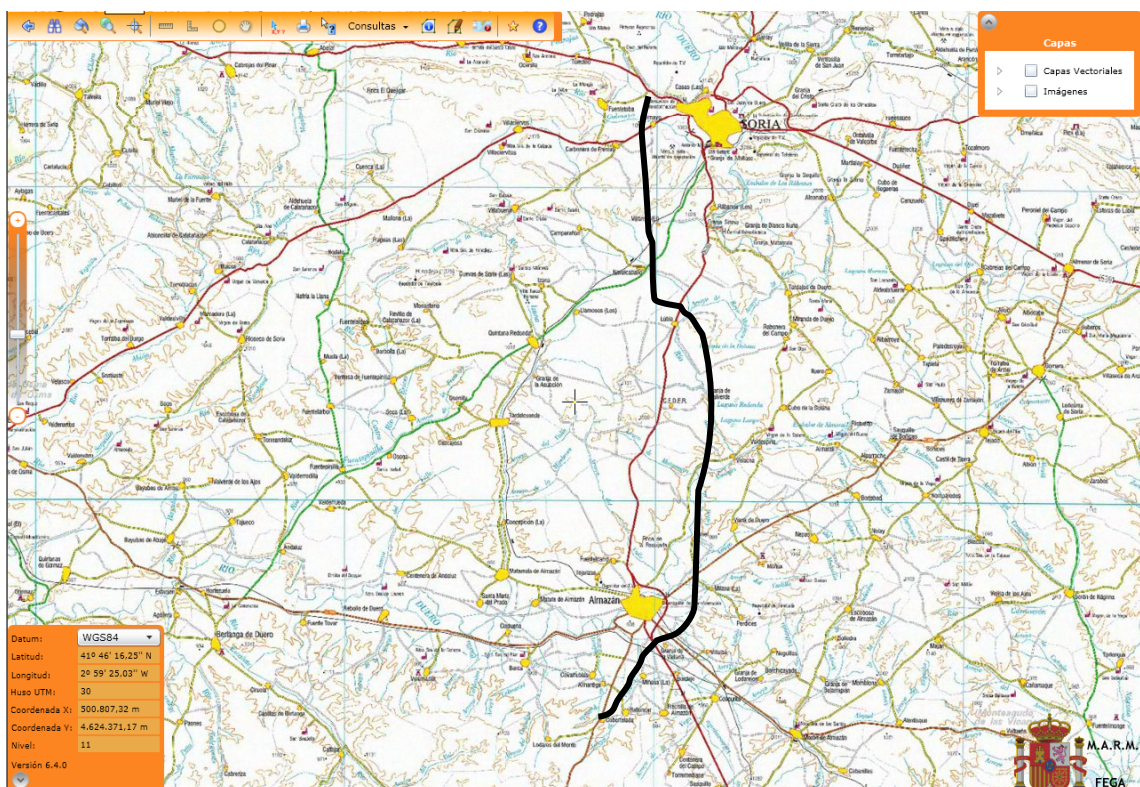


FIGURA 3: IMAGEN APROXIMADA DE LA ZONA DE PASO DE LA LINEA.



El área de estudio queda delimitada por las siguientes coordenadas UTM que hemos podido obtener con el programa SIGPAC, en las que están representadas las coordenadas de la subestación de Almazán y la subestación de Soria.

	X	Y	LATITUD	LONGITUD
SET ALMAZAN	540369,51	4587687,34	41° 26', 23,08" N	-2° 31' 0,36" W
SET SORIA	541964,72	4625016,36	41° 46' 30, 52" N	-2° 29' 42, 3" W

TABLA 1. COORDENADAS UTM DEL ÁREA DE ESTUDIO DE LA LÍNEA ELÉCTRICA.

La línea como ya se ha comentado anteriormente empieza en la subestación de transformación de Almazán y finaliza en la subestación de Soria, como lo plasma las imágenes siguientes recogidas del SIGPAC:



FIGURA 4: SUBESTACION DE TRANSFORMACION DE ALMAZÁN.



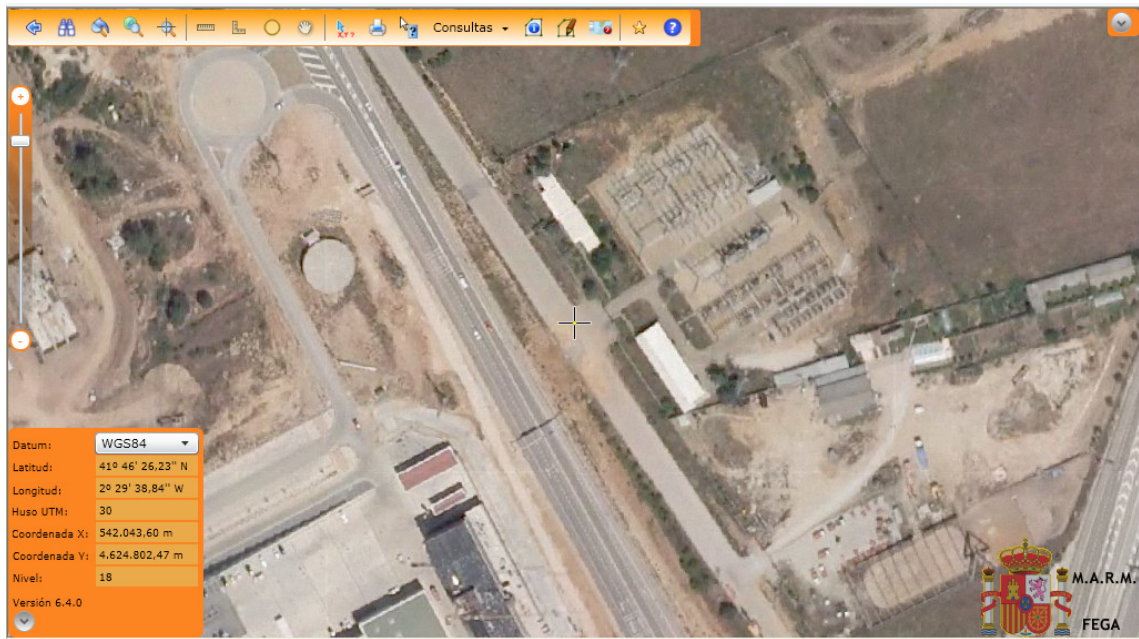


FIGURA 5: SUBESTACION DE TRANSFORMACION DE SORIA.

El reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión, divide el estudio de las acciones sobre los conductores en tres zonas según la altitud:

ZONA A	La situada a menos de 500 metros de altitud sobre el nivel del mar.
ZONA B	La situada a una altitud entre 500 y 1000 metros sobre el nivel del mar.
ZONA C	La situada a una altitud superior al 1000 metros sobre el nivel del mar.

TABLA 2. ZONAS SEGÚN LA ALTITUD DEL TERRENO

Nuestra línea pertenece a la zona C, ya que es una zona donde predominan las altitudes mayores de 1000 m, aunque hay zonas inferiores a esta altitud, cogeremos la zona C al ser la más desfavorable.

## 5. CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA

La línea eléctrica del presente proyecto es de 132 kV, de doble circuito, tiene su origen en la Subestación de Seccionamiento de Almazán de Red Eléctrica de España, S.A. y final en la Subestación de Distribución Soria y es promovido por Iberdrola Distribución Eléctrica, S.A.U.

Tiene una longitud de unos 42 621 metros en aéreo y está compuesta por un número de apoyos igual a 162, de torres metálicas de celosía.

El conductor empleado es LA-280 Hawk, aunque también vamos a analizar la línea con el conductor LA-380 Gull para poder comparar las características eléctricas que hay según la elección del conductor.

Las tensiones nominales normalizadas de la red, así como los valores correspondientes de las tensiones más elevadas se incluyen en la tabla siguiente:

Categoría de la línea	Tensión nominal de la red ( Un) kV	Tensión más elevada de la red (Us) kV
TERCERA	3	3,6
	6	7,2
	10	12
	15	17,5
	20	24
	25	30
SEGUNDA	30	36
	45	52
	66	72,5
PRIMERA	110	123
	<b>132*</b>	<b>145</b>
	150	170
	220*	245
	400*	420

TABLA 3: TENSIONES NOMINALES Y TENSIONES MÁS ELEVADAS DE LA RED.

\* Tensiones de uso preferente en redes eléctricas de transporte y distribución.

La tensión nominal de nuestra línea es de 132 kV, correspondiente a la categoría de primera y la tensión más elevada que puede soportar la red es de 145 kV según la tabla 2.

La línea objeto del presente proyecto tiene como características principales las siguientes:

Frecuencia.....	50 Hz
Tensión nominal.....	132 kV
Tensión más elevada de la red.....	145 kV
Potencia a transportar.....	305 MVA
Nº de circuitos.....	2
Disposición.....	Hexágono
Nº de conductores por fase.....	1 (simple)
Nº de cables de tierra.....	2
Longitud de la línea.....	42 621 m



FIGURA 6: DETALLE DE LA LINEA 132 kV DOBLE CIRCUITO SIMPLE.

## 5.1 CONDUCTOR

El conductor seleccionado es el tipo LA-280 Halcón, en inglés Hawk, las características de estos conductores de aluminio-acero según la norma UNE 21.018 son las siguientes:

Diámetro aparente.....	21,80 mm
Sección Al.....	241,7 mm <sup>2</sup>
Sección Ac.....	39,4 mm <sup>2</sup>
Sección total.....	281,1 mm <sup>2</sup>
Carga de rotura.....	8 820 daN
Módulo de elasticidad.....	7 700 daN/mm <sup>2</sup>
Resistencia eléctrica a 20° C.....	0,122 Ohm/km
Composición.....	26 x 3,4 + 7 x 2,7 (Al + Ac)
Peso por metro.....	0,975 kg
Coefficiente de dilatación lineal.....	18,9 x 10 <sup>-6</sup> /°C

También estudiaremos esta línea en el supuesto de que eligiéramos otro conductor distinto, en este caso LA -380 GULL, cuyas características son las siguientes:

Diámetro aparente.....	25,40 mm
Sección Al.....	241,7 mm <sup>2</sup>
Sección Ac.....	39,4 mm <sup>2</sup>
Sección total.....	381,5 mm <sup>2</sup>
Carga de rotura.....	11 135 daN
Módulo de elasticidad.....	7 000 daN/mm <sup>2</sup>



Resistencia eléctrica a 20° C.....0,087 Ohm/km

Composición..... 54 x 2,8 + 7 x 2,8 (Al + Ac)

Peso por metro.....1,276 kg

Coefficiente de dilatación lineal..... $19,30 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$



FIGURA 7: DETALLE DE UN APOYO DE ALINEACIÓN DE LA LINEA DE 132 KV.

## 5.2 AISLAMIENTO

La misión fundamental de los aisladores es evitar el paso de corriente del conductor al apoyo, Este paso de corriente se puede producir por varios factores: por conductividad de masa a través de la masa del aislador, por conductividad superficial cuando la corriente pasa contorneándose por la parte exterior del aislador, por perforación del aislador o por descarga disruptiva a través del aire.

Los aisladores utilizados en la línea serán de vidrio con sus características adecuadas a su función y las partes metálicas de los aisladores estarán protegidas adecuadamente contra la acción corrosiva de la atmósfera.

El aislamiento estará constituido por una cadena de aisladores de composite tipo U120AB132. La gama de aisladores utilizados está de acuerdo con el R.L.A.T. y con las principales normas internacionales y nacionales.

Los ensayos y tolerancias en dimensiones están de acuerdo con las normas UNE 21 909, UNE EN 60 437 y CEI Project 36-6-2.

Las características eléctricas de cada aislador son las siguientes:

Denominación.....U120AB132

Nivel de tensión.....132 KV

Carga de rotura o tracción.....120 kN

Línea de fuga mínima.....2900 mm

Longitud total.....1390 mm

Longitud aislante.....1080 mm

Masa aproximada.....5 Kg

Para saber el número de elementos que deben de constituir una cadena de aisladores, se debe de conocer el nivel de aislamiento recomendado.

los niveles de aislamiento que se han utilizado tradicionalmente, según sean las zonas que atraviesa la línea, son:

<u>Zonas</u>	<u>Niveles de aislamiento</u>
Forestales y agrícolas	1,7-2 cm/kV
Industriales y próximas al mar	2,2-2,5 cm/kV
Industriales y muy próximas al mar	2,6-3,2 cm/kV
Industriales, muy próximas al mar y con fábricas químicas	3,5 cm/kV

En nuestro caso son zonas forestales y agrícolas por lo que ya podemos saber el número de aisladores.

$$n = \frac{N_A \cdot V_e}{L_f} \quad n = \frac{2 \text{ cm/kV} \cdot 145 \text{ kV}}{29 \text{ cm}} = 10 \text{ aisladores}$$

$N_A$  = Nivel de aislamiento.

$V_e$  = Tensión más elevada que puede soportar la red.

$L_f$  = Línea de fuga mínima

Lógicamente nos sale el mismo número de aisladores que en la línea real, como se puede ver en la figura 5:

Según establece el R.L.A.T., artículo 29 °, el coeficiente de seguridad mecánico de los aisladores no será inferior a tres.

$$C.S = \text{Carga de rotura aislador} / T_{\text{máx}} \geq 3$$

$T_{\text{máx}}$  : Tracción máxima de los conductores.

La carga de rotura del aislador la obtenemos de las características del aislador que hemos elegido, 120 000 N, y la tracción máxima de los conductores, de las características del LA-280 cuyo valor es 28 812 N.

En el caso que nos ocupa tenemos una cadena de aisladores con un coeficiente de seguridad de:

$$C.S = 120\,000\text{ N} / 28\,812\text{ N} = 4,16$$

Cuyo resultado es valido ya que entra dentro del requisito marcado.

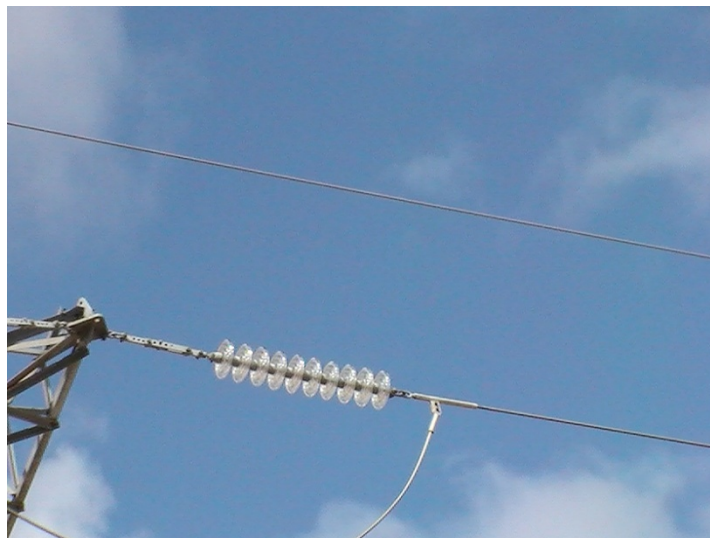


FIGURA 8: DETALLE DE LOS AISLADORES DE LA LINEA.

### 5.3 HERRAJES Y GRAPAS.

Los herrajes, medio de unión del cable conductor con la cadena de aisladores y de ésta al apoyo, están dimensionados mecánicamente para soportar las cargas máximas de los conductores y con los coeficientes de seguridad reglamentarios, siendo su material acero estampado y galvanizado en caliente como medio de protección anticorrosiva, y están de acuerdo con las normas UNE 21.158.

La grapa de compresión está compuesta por un manguito doble, de aluminio y otro de acero, que se comprimen contra el cable.

Los diferentes herrajes de las cadenas de aisladores de los apoyos de 132 kV y de los conjuntos para cable de tierra tienen una carga de rotura de 120 kN.



Los conjuntos de cadenas empleadas en la línea son de suspensión y de amarre, tipo SSS1R132C y ASS1R132C para el conductor.

Según establece el artículo 28 ° del R.L.A.T., los herrajes sometidos a tensión mecánica por los conductores y cables de tierra, o por los aisladores, deberán tener un coeficiente de seguridad mecánica no inferior a tres respecto a su carga mínima de rotura, a continuación lo comprobaremos.

### Cargas normales

Peso de una fase, con vano máximo de 390 m  $2 \cdot 9,555 \text{ N/m} \cdot 390 \text{ m} = 7\,452,9 \text{ N}$

Sobrecarga de hielo, con vano máximo de 390 m  $2 \cdot 0,36 \sqrt{21,8} \cdot 390 \text{ m} = 12\,848,47 \text{ N}$

Peso de 10 aisladores  $5 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 10 \text{ aisladores} = 490 \text{ N}$

Suma de los herrajes  $12 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ N/kg} = 117,6 \text{ N}$

Suma total  $20\,908,9 \text{ N}$

El coeficiente de seguridad mínimo será:  $C.S = 120\,000 \text{ N} / 20\,908,9 \text{ N} = 5,739 > 3$

### Cargas anormales

Según el artículo 19,1 del reglamento: el 50 % de la tensión del cable roto en las líneas de uno o dos conductores por fase y circuito.....  $0,50 \cdot 28\,812 \text{ N} = 14\,406 \text{ N}$

El coeficiente de seguridad mínimo será:  $\frac{120\,000 \text{ N}}{14\,406 \text{ N}} = 8,32 > 3$

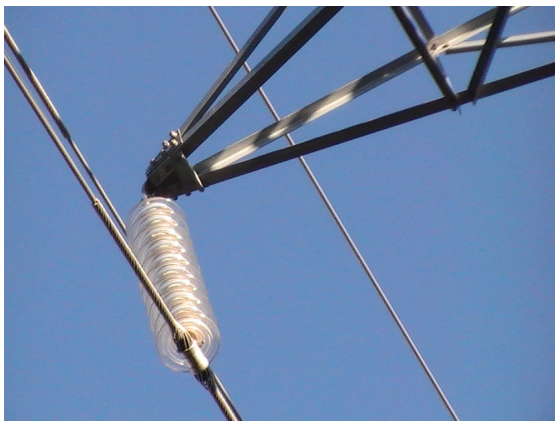


FIGURA 9: DETALLE DE LA GRAPA DE SUSPENSION

#### 5.4 APOYOS.

Las torres son metálicas, formada por perfiles de acero galvanizado, son totalmente atornillables, todas las torres van grabadas con una marca de identificación numerable. Son de celosía de ángulo tipo K, y llevan cimentación independiente en cada pata, como se pueden ver en la figura 10 y 11.

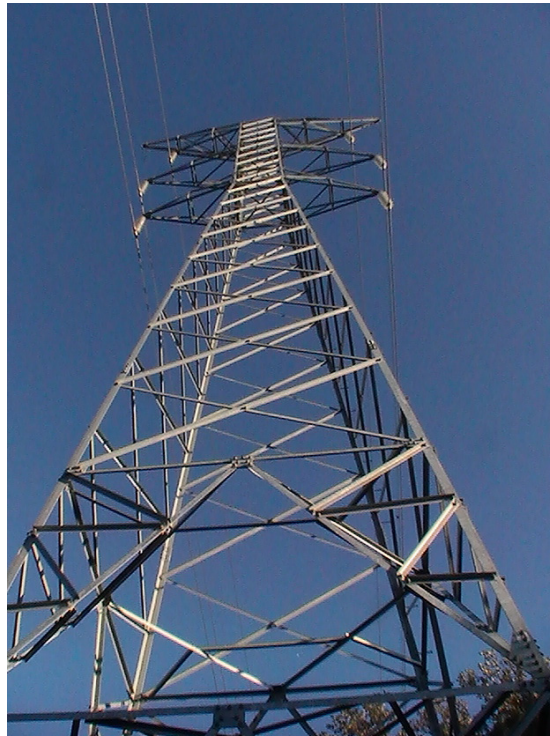


FIGURA 10: CELOSIA EN FORMA DE K.



FIGURA 11: CIMENTACIÓN INDEPENDIENTE.

## 6. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA LÍNEA ELÉCTRICA

Una línea de transmisión está caracterizada por cuatro parámetros repartidos a lo largo de su longitud: la resistencia, la inductancia, la conductancia y la capacidad.

El estudio de estos parámetros es esencial tanto desde el punto de vista del diseño como para el desarrollo de los modelos de la línea de transmisión utilizados en el análisis de sistemas de energía eléctrica.

Es posible realizar una clasificación de estos parámetros eléctricos, dependiendo de la forma en que éstos influyen dentro de un sistema eléctrico.

- Parámetros longitudinales.
  - $R \rightarrow$  RESISTENCIA  $\rightarrow$  Ohmios ( $\Omega$ )
  - $L \rightarrow$  INDUCTANCIA  $\rightarrow$  Henrios (H)
- Parámetros transversales.
  - $C \rightarrow$  CAPACIDAD  $\rightarrow$  Faradios (F)
  - $G \rightarrow$  CONDUCTANCIA  $\rightarrow$  Siemens (S)

Existen otras magnitudes que matemáticamente sirven de nexo de unión de los parámetros anteriores, algunas de las más importantes son:

- $Z = (R + jX) \rightarrow$  IMPEDANCIA  $\rightarrow$  Ohmios ( $\Omega$ )
- $Y = (G + jB) \rightarrow$  ADMITANCIA  $\rightarrow$  Siemens (S)
- $X = L\omega = L(2\pi f) \rightarrow$  REACTANCIA INDUCTIVA  $\rightarrow$  Ohmios ( $\Omega$ )
- $B = C\omega = C(2\pi f) \rightarrow$  SUCEPTANCIA  $\rightarrow$  Siemens (S)

## 6.1 CONSTANTES CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA

Las constantes características fundamentales de una línea eléctrica, por kilómetro de longitud de la misma, son cuatro:

Resistencia eléctrica..... $R_K$  ( $\Omega/\text{km}$ )

Coeficiente de autoinducción o inductancia..... $L_K$  (H/km)

Capacidad..... $C_K$  (F/km)

Conductancia o perditancia..... $G_K$  (S/km)

### 6.1.1 RESISTENCIA ELÉCTRICA

La resistencia eléctrica es la causa principal de las pérdidas de potencia en las líneas de transporte, y resulta un parámetro muy importante para la evaluación de la eficiencia en el transporte y los distintos estudios económicos que hay que realizar.

Es el parámetro más fácil de calcular, al depender únicamente del conductor y de si la línea es simple, dúplex, triplex o cuádruplex. El valor de la resistencia de los cables por cada kilómetro de longitud viene especificado en las tablas, a una temperatura de 20°C.

	Cobre	Aluminio	Acero
Resistividad a 20°C ( $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ )	0,017241	0,028264	0,163
Coeficiente de resistividad-temperatura ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	0,00393	0,00403	0,0065
Calor específico (J/kg °C)	384	899	458
Punto de fusión (°C)	1083	655	1260
Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	8970	2703	7800

TABLA 4: CARACTERÍSTICAS MATERIALES EMPLEADOS EN CONDUCTORES.

En conclusión, la resistencia depende de la temperatura de forma prácticamente lineal.



La resistencia eléctrica de un conductor es:

$$R = \frac{\rho * L}{S}$$

$\rho$  = Resistividad del conductor ( $\Omega \cdot m$ )

L = Longitud del conductor en m

S = Sección del conductor en  $mm^2$

La resistencia del conductor varía con la temperatura, y en la práctica se utiliza el valor dado por el fabricante. Dividido por dos ya que tenemos dos circuitos y en el caso de dúplex otra vez dividido por dos.

Los resultados obtenidos han sido:

Resistencia eléctrica a 20 ° C = 0,122  $\Omega$ / km.

Línea Simple LA-280 (Hawk):  $R_K = \frac{1}{2} * 0,122 \Omega / Km. = 0,061 \Omega / km.$

Línea Simple LA-380 (Gull):  $R_K = \frac{1}{2} * 0,087 \Omega / Km. = 0,0435 \Omega / km.$

Línea dúplex LA-280 (Hawk):  $R_K = \frac{1}{2} * \frac{1}{2} * 0,122 \Omega / Km. = 0,0305 \Omega / km.$

Se observa en el conductor LA-280 que la resistencia en la dúplex es la mitad que en la simple, resultado lógico ya que la línea de doble circuito dúplex opondrá menos resistencia que la simple al tener mayor sección (dos conductores en paralelo) y por lo tanto menos pérdidas.

También en el conductor LA-380 se observa que al tener una sección mayor su resistencia eléctrica dada por el fabricante es menor, lo que nos lleva a obtener una resistencia algo menor que el conductor LA-280.

### 6.1.2 COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN

Toda variación temporal de la intensidad de corriente de un circuito produce una fuerza electromotriz de inducción en el mismo, ya que tal alteración causa a su vez una modificación del flujo que, creado para aquella corriente, abarca el circuito.

Estas fuerzas electromotrices se llaman de autoinducción. Se da el nombre de coeficiente de autoinducción a la relación entre el flujo  $\Phi$  creado por la corriente en el circuito y la intensidad de la misma:

$$L = N * \frac{d\Phi}{di} \quad y$$

La reactancia inductiva se calcula empleando esta fórmula:  $X = 2\pi fL$

$$X = 2 * \pi * f * \left( \frac{\mu}{2 * n} + 4,6 * \lg \frac{DMG}{RMG} \right) * 10^{-4} \quad (H)$$

X= Reactancia aparente en ohmios por kilómetro.

f = Frecuencia de la red en hercios (50 Hz).

RMG= Radio medio geométrico de las tres fases en mm.

DMG= Distancia media geométrica de las distancias entre las tres fases en mm.

$\mu$ = Permeabilidad magnética del conductor. Para conductores de cobre, acero-aluminio y aluminio tiene un valor de uno.

Simplificadas las ecuaciones quedan de la siguiente forma:

$$L = 0,5 + 4,6 * \lg \frac{DMG}{RMG} * 10^{-4} \quad (H) \quad \text{para la línea simple.}$$

$$L = 0,25 + 4,6 * \lg \frac{DMG}{RMG} * 10^{-4} \quad (H) \quad \text{para la línea dúplex.}$$

Hemos elegido según el catalogo de Imedexsa, para el conductor LA-280 el armado que más se aproxima a nuestra línea, el armado "N", las dimensiones elegidas han sido  $b=2,7$   $c=2,5$   $a=2,4$  y  $h=3,4$  que corresponden al tipo NH3C y para el conductor LA-380 han sido  $b=2,5$   $c=2,5$   $a=2,4$  y  $h=3,7$  que corresponden al tipo NG2C.

Armado "N"									
Tipo	DIMENSIONES				PESO (Kg)				
	a	b	c	h	2.000	2.500/ 4.500	6.000/ 7.000	9.000	13.000
NH1C	2,0	2,0	2,1	3,4	531	586	702	702	---
NH2C	2,0	2,7	2,4	3,4	587	688	796	814	984
NH3C	2,4	2,7	2,5	3,4	607	734	838	856	1.036
NH4C	2,8	3,4	2,9	4,0	753	882	991	1.028	1.306

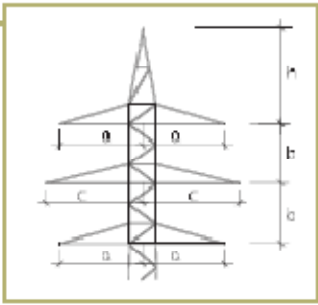


TABLA 5: CARACTERISTICAS DEL ARMADO DE LA LINEA LA-280.

## Doble Circuito

ARMADOS		DENOMINACIÓN				
		NG1C	NG2C	NG3C	NG4C	
Dimensiones	a	2	2,4	2,4	2,9	
	b	2	2,5	3	4	
	c	2,1	2,5	2,8	3,1	
	h	3,7	3,7	3,7	4,3	
PESO (Kg)	ÁGUILAS	3.000	687	797	881	1.127
		6.000	707	843	896	1.127
		9.000	843	996	1.074	1.333
		12.000	901	1.044	1.116	1.394
	ÁGUILAS REALES	9.000	931	1.092	1.210	1.510
		12.000	954	1.105	1.217	1.536
		14.000	1.016	1.185	1.284	1.614
		18.000	1.076	1.250	1.377	1.748
		21.000	1.113	1.351	1.419	1.764

Diagrama de un armario de tipo "Doble Circuito". El diagrama muestra una estructura central con dos circuitos de transmisión. Las dimensiones están indicadas por líneas con flechas: 'a' es la distancia horizontal entre los conductores de un mismo circuito; 'b' es la distancia horizontal entre los conductores de los dos circuitos; 'c' es la distancia horizontal entre los conductores de un mismo circuito en un nivel superior; 'h' es la altura total del armario. Las etiquetas 'a', 'b', 'c' y 'h' están repetidas en los lados izquierdo y derecho del diagrama.

TABLA 6: CARACTERÍSTICAS DEL ARMADO DE LA LÍNEA LA-380.

Para el conductor LA-280 el desarrollo es el siguiente:

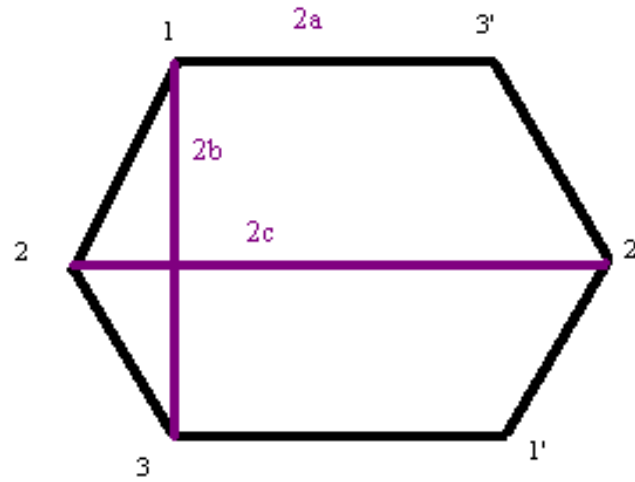


FIGURA 10: DISPOSICION Y DISTANCIAS ENTRE FASES.

Las distancias medias geométricas se calculan así:

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{12} \cdot D_{12'} \cdot D_{13} \cdot D_{13'}}}{D_{11'}} = \frac{\sqrt{2,7018 \cdot 5,59 \cdot 5,5 \cdot 4,8}}{7,225} = 2,7637 \text{ m}$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{21} \cdot D_{21'} \cdot D_{23} \cdot D_{23'}}}{D_{22'}} = \frac{\sqrt{2,7018 \cdot 7,7136 \cdot 2,7018 \cdot 7,7136}}{5} = 4,168 \text{ m}$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{31} \cdot D_{31'} \cdot D_{32} \cdot D_{32'}}}{D_{33'}} = \frac{\sqrt{5,4 \cdot 4,8 \cdot 2,7018 \cdot 5,59}}{7,225} = 2,738 \text{ m}$$

$$D_T = \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3} = \sqrt[3]{2,7637 \cdot 4,168 \cdot 2,738} = 3,1596 \text{ m}$$

Para la línea real, es decir, de doble circuito simple, el coeficiente de autoinducción y la reactancia es la siguiente:

$$L = 0,5 + 4,6 \cdot \log \frac{DMG}{RMG} = (0,5 + 4,6 \cdot \log \frac{3,1596}{0,0109}) \cdot 10^{-4} = 1,1826 \cdot 10^{-3} \text{ H/km}$$

$$X_K = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \omega = \frac{1}{2} \cdot 1,1826 \cdot 10^{-3} \cdot 314 = 0,1856 \text{ } \Omega/\text{km}$$



Si fuera dúplex (contamos con que la separación entre conductores de fase es de 40 cm):

$$L = 0,25 + 4,6 * \log \frac{DMG}{\sqrt{RMG*d}} = (0,25 + 4,6 * \log \frac{3,1596}{\sqrt{0,0109*0,4}}) * 10^{-4} = 7,977 * 10^{-4} \text{ H/km}$$

$$X_K = \frac{1}{2} * L * \omega = \frac{1}{2} * 7,977 * 10^{-4} * 314 = 0,1252 \text{ } \Omega/\text{Km}$$

Se puede observar, que la línea simple tiene un coeficiente de autoinducción mayor que la línea dúplex, debido a que por la línea simple atravesará menos intensidad que por la dúplex.

Para el conductor LA-380 el desarrollo es el siguiente:

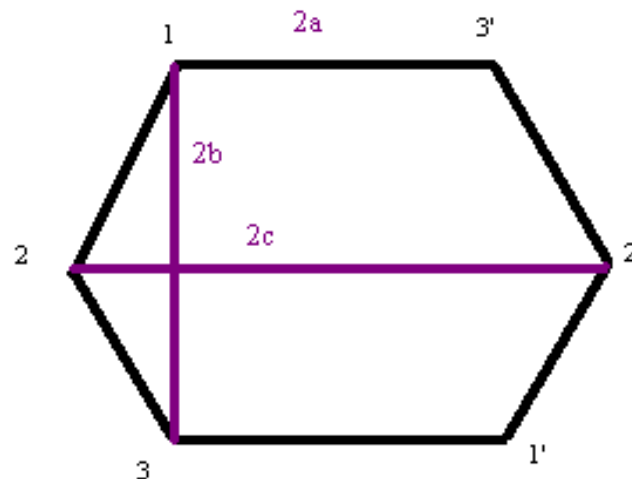


FIGURA 11: DISPOSICION Y DISTANCIAS ENTRE FASES.

Las distancias medias geométricas de la línea LA-380 (GULL) son las siguientes:

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{12} * D_{12'} * D_{13} * D_{13'}}}{D_{11'}} = \frac{\sqrt{2,502 * 5,5 * 5 * 4,8}}{6,93} = 2,6223 \text{ m}$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{21} * D_{21'} * D_{23} * D_{23'}}}{D_{22'}} = \frac{\sqrt{2,502 * 5,5 * 2,502 * 5,5}}{5} = 2,7522 \text{ m}$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{31} * D_{31'} * D_{32} * D_{32'}}}{D_{33'}} = \frac{\sqrt{5 * 4,8 * 2,502 * 5,5}}{6,93} = 2,6223 \text{ m}$$

$$D_T = \sqrt[3]{D_1 * D_2 * D_3} = \sqrt[3]{2,7637 * 4,168 * 2,738} = 2,6649 \text{ m}$$

Y el coeficiente de autoinducción y la reactancia:

$$L = 0,5 + 4,6 * \log \frac{DMG}{RMG} = (0,5 + 4,6 * \log \frac{2,6649}{0,0127}) * 10^{-4} = 1,118 * 10^{-3} \text{ H/Km}$$

$$X_K = \frac{1}{2} * L * \omega = 1,118 * 10^{-3} * 314 = 0,1755 \text{ } \Omega/\text{Km}$$

Se observa que el coeficiente de autoinducción de la línea LA-380 es un poco menor que la línea LA-280, con lo que le permitiría transportar mayor energía.

### 6.1.3 CAPACIDAD

La capacidad de la línea viene dado por la siguiente fórmula, teniendo en cuenta que la distancia media geométrica propia cambia y que el radio no es el radio medio geométrico del conductor sino su radio exterior real que nos da el fabricante:

Para el conductor doble circuito simple LA-280 Halcón:

$$C_K = \frac{24,2}{\log \frac{DMG}{RMG}} * 10^{-9} = \frac{24,2}{\log \frac{3,1596}{0,0109}} * 10^{-9} = 9,8289 * 10^{-9} \text{ F/km}$$

$$B_K = 2 * C_K * \omega = 2 * 9,8289 * 10^{-9} * 314 = 6,172 * 10^{-6} \text{ S/km}$$

Para el conductor doble circuito simple LA-380 Gull:

$$C_K = \frac{24,2}{\log \frac{DMG}{RMG}} * 10^{-9} = \frac{24,2}{\log \frac{2,6649}{0,0127}} * 10^{-9} = 1,0422 * 10^{-8} \text{ F/km}$$

$$B_K = 2 * C_K * \omega = 2 * 1,0422 * 10^{-8} * 314 = 6,545 * 10^{-6} \text{ S/km}$$

Para el conductor doble circuito dúplex LA-280 halcón:

$$C_K = \frac{24,2}{\log \frac{DMG}{\sqrt{RMG * d}}} * 10^{-9} = \frac{24,2}{\log \frac{3,1596}{\sqrt{0,0109 * 0,4}}} * 10^{-9} = 1,4405 * 10^{-8} \text{ F/Km}$$

$$B_K = 2 * C_K * \omega = 2 * 1,4405 * 10^{-8} * 314 = 9,046 * 10^{-6} \text{ S/Km}$$

#### 6.1.4 PERDIDAS EN UNA LÍNEA

Hasta ahora hemos supuesto que el aislante (aire) entre dos conductores de una línea aérea era perfecto, es decir, no había pérdidas por falta de aislamiento. En realidad esto no es totalmente cierto, ya que en algunos casos, cuando la tensión es relativamente grande respecto a la separación entre conductores, se producen unas corrientes de fuga cuyos efectos trataremos a continuación.

##### **Tensión crítica disruptiva en una línea.**

Si los conductores de una línea eléctrica alcanzan un potencial lo suficientemente grande para que se rebase la rigidez dieléctrica del aire, se producen pérdidas de energía debido a la corriente que se forma a través del medio. Es decir, que todo sucede como si parte del volumen de aire se hiciera conductor, dando lugar a una corriente de fuga.

En los conductores aéreos, el efecto es visible en la oscuridad, pudiéndose apreciar como quedan envueltos por un halo luminoso, azulado de sección transversal circular, es decir, en forma de corona, por lo que al fenómeno se le conoce con el nombre de efecto corona.

La tensión por la cual empiezan las pérdidas en el aire, se llama tensión crítica disruptiva, y para ella el fenómeno no es aún visible. Los efluvios se hacen luminosos cuando se alcanza la tensión crítica visual; es decir, que la disruptiva es de valor menor que la visual. Las pérdidas empiezan a producirse desde el momento en que la tensión de la línea se hace mayor que la tensión crítica disruptiva.

El valor de esta tensión crítica, a partir del cual se inician las pérdidas, depende de diversos factores como son el diámetro, la separación y rugosidad de los conductores, el estado higrométrico del aire y su densidad.

La fórmula general o fórmula de Peek, para calcular la tensión crítica, se fundamenta en que la del aire a una presión de 760 mmHg y a una temperatura de 25 °C es de  $V_c = 29,8 \text{ kV/cm}$ .

$$V_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \sqrt{3} m_c \cdot m_t \cdot F_{cr} \cdot \ln \frac{d}{r} \text{ kV}$$

Como  $r$  es el radio del conductor, se puede expresar  $V_C$  en función del diámetro y realizando la operación de las constantes queda:

$$V_C = 36,5 \cdot m_C \cdot m_t \cdot F_C \cdot \frac{D}{2} \cdot \ln \frac{2d}{D} \text{ kV}$$

En donde:

\* $V_C$  es la tensión crítica compuesta en kV.

\* $D$  es el diametro del conductor expresado en centímetros.

\* $d$  es la separación entre conductores en centímetros.

\* $m_C$  es el factor de corrección debido a la rugosidad del conductor.

$m_C=1$  (hilos lisos y pulidos)

$m_C=0,95$  (hilos oxidados y ligeramente rugosos)

$m_C=0,85$  (cables)

\* $m_t$  es el factor de corrección debido al estado higrométrico del aire:

$m_t=1$  tiempo seco

$m_t=0,8$  tiempo lluvioso

\* $F_C$  es el factor de corrección debido a la densidad del aire:

$$F_C = \frac{3,926 \cdot h}{273 + t_m}$$

siendo:

\* $h$  presión barométrica en cm de Hg

\* $t_m$  temperatura media en °C

La presión barométrica en función de la altitud de paso de la línea viene definida por la siguiente igualdad:

$$\ln h = \ln 76 - 2,3 * \frac{Alt}{18336}$$

Alt=Altitud (m)

Es beneficioso que la tensión crítica  $V_C$  sea algo menor que la tensión de funcionamiento normal de la línea, ya que en caso de sobretensiones el efecto corona hace el papel de auto válvula de descarga.

1. Cálculo para tiempo seco:

\*Presión barométrica:

$$\ln h = \ln 76 - 2,3 * \frac{1000}{18336}$$

\*Factor de corrección debido a la densidad del aire:

$$h = e^{4,20} = 67,04 \text{ cmHg}$$

$$F_C = \frac{3,926 * h}{273 + tm} = 1$$

\*Sustituyendo los valores en la formula obtenemos:

$$V_C = 36,5 * 0,85 * 1 * 1^{\frac{2,18}{2}} * \ln \frac{2 * 315,96}{2,18} \text{ kV} = 191,72 \text{ kV}$$

2. Cálculo para tiempo lluvioso

\*Presión barométrica:

$$\ln h = \ln 76 - 2,3 * \frac{1000}{18336}$$

\*Factor de corrección debido a la densidad del aire:

$$h = e^{4,20} = 67,04 \text{ cmHg}$$

$$F_C = \frac{3,926 * h}{273 + tm} = 1$$

\*Sustituyendo los valores en la formula obtenemos:



$$V_C = 36,5 * 0,85 * 0,8 * 1^{\frac{2,18}{2}} * \ln \frac{2 * 315,96}{2,18} \text{ kV} = 153,37 \text{ kV}$$

### 3. Conclusión

No basta hacer la comparación con la tensión nominal de la línea,  $U=132 \text{ KV}$ , sino que es necesario tener en cuenta el valor de la tensión más elevada, que define el artículo 2, del reglamento de líneas eléctricas Aéreas de Alta Tensión.

Según el cuadro de dicho artículo, a la nominal de  $132 \text{ kV}$  le corresponde como tensión más elevada la de  $145 \text{ kV}$ .

Por tanto:

$$U < U_{me} < U_c$$

$$132\text{kV} < 145\text{kV} < 153,37 \text{ kV}$$

De donde deducimos que no tenemos efecto ni en tiempo seco ni en tiempo lluvioso.

### Conductancia o Perditancia

Si el aislamiento de las líneas fuera perfecto, no habría corriente alguna entre los conductores y el apoyo.

Dicha corriente puede ser por la superficie de los aisladores o a través de su masa, y da lugar a pérdidas por conductancia, que serían nulas si el aislamiento fuese total.

El hecho es que existen tales corrientes, por grande que sea el aislamiento de las líneas.

La intensidad de corriente debida a la conductancia será, según la ley de ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

Siendo:

-I: intensidad de corriente (A).

-V: diferencia de potencial, entre el conductor y tierra (V).

-R: resistencia del aislamiento ( $\Omega$ ).

Se ha convenido en llamar conductancia o perditancia al valor inverso de dicha resistencia, o sea que:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V}$$

La intensidad de la corriente de pérdida estará en fase con la tensión y, siendo activa, dará lugar a una pérdida de potencia, perditancia, que valdrá:

$$P = I * V = G * V^2$$

De donde:

$$G = \frac{P}{V^2}$$

Expresión en la que si P es en watios y V es en voltios, tendremos que G es en Siemens.

El Siemens es la conductancia correspondiente a una resistencia de un ohmio.

El valor de la conductancia puede variar mucho según el grado de humedad atmosférica. En una línea bien aislada, y con tiempo seco, es prácticamente nula, los aisladores no dejan pasar a través de ellos, por conductividad, más que una pequeñísima corriente, y solo puede estimarse pérdidas por efecto corona.

Por consiguiente en la práctica y para la línea a estudio y teniendo en cuenta los resultados en el estudio del efecto corona, consideramos nulo el valor de la conductancia:

Línea Simple y dúplex       $G = 0 \text{ S/km}$

## 6.2 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

De las cuatro características fundamentales por kilómetro de línea consideradas en el apartado anterior se deducen otras que son:

Resistencia eléctrica.....R ( $\Omega$ )

Reactancia de autoinducción.....X ( $\Omega$ )

Suceptancia.....B (S)

Perditanza.....G (S)

Impedancia.....Z ( $\Omega$ )

Admitancia.....Y (S)

Estas características dependen de la longitud de la línea, en nuestro caso es de 42,621 km.

### 6.2.1 RESISTENCIA ELÉCTRICA

Según lo calculado en el apartado anterior obtenemos la resistencia eléctrica para los diferentes casos:

Línea Simple LA-280 (Hawk):  $R = 1/2 * 0,122 \Omega / \text{km} * 42,621 \text{ km} = 2,599 \Omega$

Línea Simple LA-380 (Gull):  $R = 1/2 * 0,087 \Omega / \text{km} * 42,621 \text{ km} = 1,854 \Omega$

Línea dúplex LA-280 (Hawk):  $R = 1/2 * 1/2 * 0,122 \Omega / \text{km} * 42,621 \text{ km} = 1,3 \Omega$

### 6.2.2 REACTANCIA DE AUTOINDUCCIÓN

La reactancia de autoinducción está definida por la expresión:

$$X_K = \frac{1}{2} * L * \omega$$

$\omega$  = pulsación de la corriente (rad/s)

L = Coeficiente de autoinducción.

Línea Simple (Hawk)

$$X = \frac{1}{2} * L * \omega = \frac{1}{2} * 1,1826 * 10^{-3} * 314 * 42,621 \text{ km} = 7,91 \, \Omega$$

Línea Simple (GULL)

$$X = \frac{1}{2} * L * \omega = 1,118 * 10^{-3} * 314 * 42,621 \text{ km} = 7,48 \, \Omega$$

Línea dúplex (Hawk)

$$X = \frac{1}{2} * L * \omega = \frac{1}{2} * 7,977 * 10^{-4} * 314 * 42,621 \text{ km} = 5,34 \, \Omega$$

### 6.2.3 SUCEPTANCIA

La expresión de la suceptancia es:

$$B_K = C_K * \omega$$

C=Capacidad de la línea (F/km)

$\omega$  = pulsación de la corriente (rad/s)

Línea Simple LA-280 (Hawk):

$$B = 2 * C * \omega = 2 * 9,8289 * 10^{-9} * 314 * 42,621 \text{ km} = 2,630 * 10^{-4} \text{ S}$$

Línea Simple LA-380 (Gull):

$$B = 2 * C * \omega = 2 * 1,0422 * 10^{-8} * 314 * 42,621 \text{ km} = 2,790 * 10^{-4} \text{ S}$$

Línea duplex LA-280 (Hawk):

$$B = 2 * C * \omega = 2 * 1,4405 * 10^{-8} * 314 * 42,621 \text{ km} = 3,856 * 10^{-4} \text{ S}$$

#### 6.2.4 IMPEDANCIA

La impedancia es una magnitud vectorial o compleja, cuyos componentes ortogonales son:

Componente real..... $R_K$

Componente imaginaria..... $X_K$

$$Z_K = R_K + jX_K \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

El módulo y el argumento del vector son, respectivamente:

Línea Simple LA-280 (Hawk):

$$Z_K = 0,061 \Omega/\text{km} + j0,1856 \Omega/\text{km} = 0,195 \angle 71,8^\circ \Omega/\text{km}$$

$$Z = 0,1953 \angle 71,806^\circ \Omega/\text{km} \cdot 42,621 \text{ km} = 8,323 \angle 71,8^\circ \Omega$$

Línea Simple LA-380 (Gull):

$$Z_K = 0,0435 \Omega/\text{km} + j0,1755 \Omega/\text{km} = 0,181 \angle 76,1^\circ \Omega/\text{km}$$

$$Z = 0,1808 \angle 76,079^\circ \Omega/\text{km} \cdot 42,621 \text{ km} = 7,706 \angle 76,1^\circ \Omega$$

Línea dúplex LA-280 (Hawk):

$$Z_K = 0,0305 \Omega/\text{km} + j0,1252 \Omega/\text{km} = 0,129 \angle 76,3^\circ \Omega/\text{km}$$

$$Z = 0,1288 \angle 76,30^\circ \Omega/\text{km} \cdot 42\,621 \text{ m} = 5,489 \angle 76,3^\circ \Omega$$

#### 6.2.5 ADMITANCIA

La admitancia tiene la siguiente expresión:

$$Y_K = G_K + jB_K \text{ (S/km)}$$

Es también una magnitud vectorial o compleja, cuyos componentes ortogonales son:

Componente real.....  $G_K$



Componente imaginaria.....  $B_K$

Como  $G_K = 0$  entonces la admitancia queda de la siguiente forma:

$$Y_K = j \cdot B_K \text{ (S/km)}$$

El modulo y el argumento del vector son, respectivamente:

Línea Simple LA-280 (Hawk):

$$Y_K = j \cdot 6,1723 \cdot 10^{-6} \text{ S/km} = 6,17 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/km}$$

$$Y = 6,1723 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/km} \cdot 42\,621 \text{ m} = 2,63 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ S}$$

Línea Simple LA-380 (Gull):

$$Y_K = j \cdot 6,5454 \cdot 10^{-6} \text{ S/km} = 6,54 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/km}$$

$$Y = 6,5454 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/km} \cdot 42\,621 \text{ m} = 2,79 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ S}$$

Línea dúplex LA-280 (Hawk):

$$Y_K = j \cdot 9,0467 \cdot 10^{-6} \text{ S/km} = 9,05 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/km}$$

$$Y = 9,0467 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/km} \cdot 42\,621 \text{ m} = 3,85 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ S}$$

### 6.3. IMPEDANCIA Y POTENCIA CARACTERÍSTICA

#### 6.3.1 Impedancia característica.

La impedancia característica de una línea eléctrica no depende ni de su longitud ni de la frecuencia de la corriente que la recorre.

Línea Simple LA-280 (Hawk):

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{8,323 \angle 71,806^\circ}{2,63 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ}} = 177,89 \angle -3,97^\circ \Omega$$

Línea Simple LA-380 (Gull):

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{7,7058 \angle 76,079^\circ}{2,7896 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ}} = 166,20 \angle -63,49^\circ \Omega$$

Línea Dúplex LA-280 (Hawk):

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{5,489 \angle 76,30^\circ}{3,855 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ}} = 119,32 \angle -60,74^\circ \Omega$$

### 6.3.2 Potencia característica

Llamaremos potencia característica o natural de una línea,  $P_c$ , a la potencia correspondiente a la impedancia característica  $Z_c$ , además:

- La potencia característica no depende de su longitud y es función del cuadrado de la tensión de transporte.
- Puesto que para la potencia característica, el valor de la capacidad contrarresta al de la autoinducción, cuando la línea transporte una potencia igual a la característica, el coseno de  $\phi$  será constante a lo largo de la línea.

Línea Simple LA-280 (Hawk)

$$P_c = \frac{U^2}{Z_c} = \frac{(132000)^2}{177,89} = 97,9 \text{ MW}$$

Línea Simple LA-380 (Gull)

$$P_c = \frac{U^2}{Z_c} = \frac{(132000)^2}{166,1905} = 104,84 \text{ MW}$$

Línea Dúplex LA-280 (Hawk):

$$P_c = \frac{U^2}{Z_c} = \frac{(132000)^2}{119,31} = 146 \text{ MW}$$

#### **6.4: RESUMEN DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS**

	Doble circuito Simple LA-280 Hawk	Doble circuito LA-280 duplex	Doble circuito Simple LA-380 Gull
<b>Constantes Kilométricas</b>			
Resistencia eléctrica	0,061Ω/km	0,0305 Ω/km	0,0435 Ω/km
Reactancia de autoinducción	0,1856 Ω/km	0,1252 Ω/km	0,1755 Ω/km
Susceptancia	6,172*10E-6 S/km	9,046*10E-6 S/km	6,545*10-6 S/km
Perditancia	0	0	0
<b>Características eléctricas</b>			
Resistencia eléctrica	2,599 Ω	1,3 Ω	1,854 Ω
Reactancia de autoinducción	7,91 Ω	5,34 Ω	7,48 Ω
Susceptancia	2,630*10 <sup>-4</sup> S	3,856*10 <sup>-4</sup> S	2,790*10 <sup>-4</sup> S
Perditancia	0	0	0
Impedancia	8,323∠71,8° Ω	5,489∠76,3° Ω	7,706∠76,1° Ω
Admitancia	2,63*10 <sup>-4</sup> ∠90° S	3,85*10 <sup>-4</sup> ∠90° S	2,79*10 <sup>-4</sup> ∠90° S
Impedancia características	177,89Ω	119,32Ω	166,20
Ángulo característico	θ=-3,97°	θ=-60,74°	θ=-63,49°
Potencia característica	97,9 MW	146 MW	104,84 MW

## 6.5 METODO DEL MOMENTO ELÉCTRICO.

El método del momento eléctrico permite determinar de forma aproximada, la potencia de transporte, la pérdida de ésta y la distancia a la que podrá ser transmitida.

Para estudios en los que basta llegar a resultados sólo aproximados, la aplicación del método del momento eléctrico permite calcular con gran rapidez diversos conductores, para diferentes tipos de línea, como es el caso que nos lleva, de doble circuito simple y dúplex.

Primero desarrollaremos el método para la línea actual, doble circuito simple LA-280 (Halcón), tanto en este caso como en el de los demás, utilizaremos una caída de tensión del 7% ya que es la más usual y un  $\cos \varphi = 0,9$ :

El momento eléctrico según las características impuestas anteriormente será:

$$M = \frac{u}{100} * \frac{U^2}{Rk + Xk * \operatorname{tg} \varphi} = \frac{7}{100} * \frac{132^2}{0,061 + 0,1856 * 0,484} = 8086,43 \text{ MW km}$$

La potencia de transporte aplicando la relación será:

$$P_A = \frac{M}{L} = \frac{8086,43 \text{ MW km}}{42,621 \text{ km}} = 189,73 \text{ MW}$$

Para la línea real de longitud 42,621 km:

$$p_K(\%) = \frac{100 * Rk * P_A}{U^2 * \cos^2 \varphi} = \frac{100 * 0,061 * 189,7288}{132^2 * 0,9^2} = 0,082 \%$$

En la línea de 42,621 km, la pérdida en tanto por cien será:

$$p_{42,621 \text{ km}}(\%) = 0,082 \% * 42,621 \text{ km} = 3,4949 \%$$

En valor absoluto:

$$P = 0,034949 * 189,7288 \text{ MW} = 6,63 \text{ MW}.$$

Potencia máxima por límite térmico.

$$P_{\max} = \sqrt{3} * U * I_{\max} * \cos \varphi = \sqrt{3} * 132 * 10^3 * 1162,4485 * 0,9 = 239,19 \text{ MW}$$

Pérdida de potencia:

La pérdida de potencia que, por el efecto Joule, se produce en la línea viene dada por la expresión:

$$P_p = 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot L = 10,53 \text{ MW}$$

Rendimiento de la línea, viene dado por la expresión:

$$\eta = (\text{Pot. Total} - \text{Pot. perdida}) \cdot 100 / \text{Pot. Total} = 95,59 \%$$

Y la distancia mínima es la siguiente:

$$L = \frac{M}{P} = \frac{8086,43}{238,9} = 33,8459 \text{ km}$$

La intensidad máxima ha sido calculada mediante la tabla 11 del RLAT, cuyo apartado nos proporciona una tabla numérica y unos coeficientes para utilizar en los cálculos.

En función de estos datos hemos determinado las densidades de corrientes máximas admisibles, para el LA-280 y para el LA-380, así como las intensidades máximas correspondientes.

Como las secciones de los conductores de cables de aluminio-acero, no vienen en la tabla, hay que proceder a interpolaciones.

Para el conductor LA-280, tenemos:

Sección del cable: 281,1 mm<sup>2</sup>

De 250 a 300 mm<sup>2</sup> = +50 mm<sup>2</sup> ..... De 2,30 a 2,15 A/mm<sup>2</sup> = -0,15 A/mm<sup>2</sup>

De 250 a 281,1 = +31,1 mm<sup>2</sup> ..... x

$$x = \frac{31,1 \cdot (-0,15)}{50} = -0,0933 \text{ A/mm}^2$$

Como este cable es de composición 26+7, el coeficiente reglamentario que hay que aplicar es de 0,937.



Por tanto la densidad máxima será:

$$\delta_{\max} = (2,30 - 0,0933) * 0,937 = 2,0676 \text{ A/mm}^2$$

Y la intensidad correspondiente:

$$I_{\max} = 2,0676 \text{ A/mm}^2 * 281,1 \text{ mm}^2 = 581,224 \text{ A}$$

Como el circuito es doble de un conductor por fase, la intensidad máxima en este caso será el doble, es decir  $I_{\max} = 2 * 581,224 \text{ A} = 1162,4485 \text{ A}$ .

Para el circuito doble dúplex, la intensidad máxima en este caso será el doble de la anterior, es decir  $I_{\max} = 2 * 1162,4485 \text{ A} = 2324,89 \text{ A}$ .

Calculamos el método para la línea doble circuito dúplex Halcón, con las características utilizadas anteriormente:

El momento eléctrico para la línea si fuera dúplex será:

$$M = \frac{u}{100} * \frac{U^2}{Rk + Xk * \operatorname{tg} \varphi} = \frac{7}{100} * \frac{132^2}{0,0305 + 0,1252 * 0,484} = 13\,388,83 \text{ MWkm}$$

La potencia de transporte de la línea:

$$P_A = \frac{M}{L} = \frac{13.388,83 \text{ MWkm}}{42,621 \text{ km}} = 314,14 \text{ MW}$$

Pérdida de potencia:

$$p_K(\%) = \frac{100 * Rk * P_A}{U^2 * \cos^2 \varphi} = \frac{100 * 0,0305 * 314,137}{132^2 * 0,9^2} = 0,06788 \%$$

En la línea de 42,621 km, la pérdida en tanto por cien será:

$$p_{42,621\text{km}}(\%) = 0,06788 \% * 42,621 \text{ km} = 2,8934 \%$$

En valor absoluto:

$$P = 0,028934 * 314,137 = 9,089 \text{ MW}$$

Potencia máxima por límite térmico:

$$P_{\max} = \sqrt{3} * U * I_{\max} * \cos \varphi = \sqrt{3} * 132 * 10^3 * 2324,89 * 0,9 = 478,388 \text{ MW}$$

Y la distancia mínima es la siguiente:

$$L = \frac{M}{P} = \frac{13388,83}{478,388} = 27,9873 \text{ km}$$

Ahora calculamos también el método para la línea doble circuito simple LA-380, utilizando como anteriormente una caída de tensión de 7% y un  $\cos \varphi = 0,9$ :

El momento eléctrico de la línea LA-380 será:

$$M = \frac{u}{100} * \frac{U^2}{R_k + X_k * \operatorname{tg} \varphi} = \frac{7}{100} * \frac{132^2}{0,0435 + 0,1755 * 0,484} = 9495,95 \text{ MWkm}$$

La potencia de transporte de la línea:

$$P_A = \frac{M}{L} = \frac{9495,95 \text{ MWkm}}{42,621 \text{ km}} = 222,8 \text{ MW}$$

Pérdida de potencia:

$$p_k(\%) = \frac{100 * R_k * P_A}{U^2 * \cos^2 \varphi} = \frac{100 * 0,0435 * 222,8}{132^2 * 0,9^2} = 0,0686 \%$$

En la línea de 42,621 km, la pérdida en tanto por cien será:

$$p_{42,621 \text{ km}}(\%) = 0,0686 \% * 42,621 \text{ km} = 2,926 \%$$

En valor absoluto:

$$P = 0,02926\% * 222,8 \text{ MW} = 6,5191 \text{ MW}$$

Potencia máxima por límite térmico.

$$P_{\max} = \sqrt{3} * U * I_{\max} * \cos \varphi = \sqrt{3} * 132 * 10^3 * 1440,2769 * 0,9 = 296,36 \text{ MW}$$

Para el cálculo de la  $I_{\max}$  del conductor LA-380, hemos realizado el mismo desarrollo que para el conductor LA-280:

Sección del cable: 381,5 mm<sup>2</sup>

De 300 a 400mm<sup>2</sup> = +100 mm<sup>2</sup>.....De 2,15 a 1,95 A/mm<sup>2</sup> = -0,2 A/mm<sup>2</sup>

De 300 a 381,5 = +81,5 mm<sup>2</sup>.....x

$$x = \frac{81,5 * (-0,2)}{100} = -0,163 \text{ A/mm}^2$$

Como este cable es de composición 54+7, el coeficiente reglamentario que hay que aplicar es de 0,95.

Por tanto la densidad máxima será:

$$\delta_{\max} = (2,15 - 0,163) * 0,95 = 1,88765 \text{ A/mm}^2$$

Y la intensidad correspondiente:

$$I_{\max} = 1,88765 \text{ A/mm}^2 * 381,5 \text{ mm}^2 = 720,13 \text{ A}$$

Como el circuito es doble de un único conductor por fase, la intensidad máxima en este caso será el doble, es decir  $I_{\max} = 2 * 720,13 \text{ A} = 1\,440,27 \text{ A}$ .

Y la distancia mínima es la siguiente:  $L = \frac{M}{P} = \frac{9495,95}{296,36} = 32,0419 \text{ km}$

En la tabla siguiente se plasman los datos más importantes calculados y alguna observación.

			PÉRDIDAS DE POTENCIA		
	LÍNEA	POTENCIAS DE TRANSPORTE MW	En Porcentaje%	En valor absoluto MW	OBSERVACIONES
LA-280	DOBLE CIRCUITO SIMPLE	PA=189,73	3,4949	6,63	Pérdida máxima porcentual
	DOBLE CIRCUITO DUPLEX	PB=314,14	2,8934	9,089	Potencia máxima de transporte
LA-380	DOBLE CIRCUITO SIMPLE	PC=222,8	2,926	6,5191	

TABLA 8: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA LÍNEA.

Las relaciones entre las potencias de transporte calculadas son las siguientes:

La relación entre las potencias de transporte de la línea con un circuito dúplex y la misma con uno simple es:

$$\frac{PB}{PA} = \frac{314,14}{189,73} = 1,65$$

Esta relación nos dice que la línea doble circuito dúplex es, aproximadamente, un 65 % más potente que la simple.

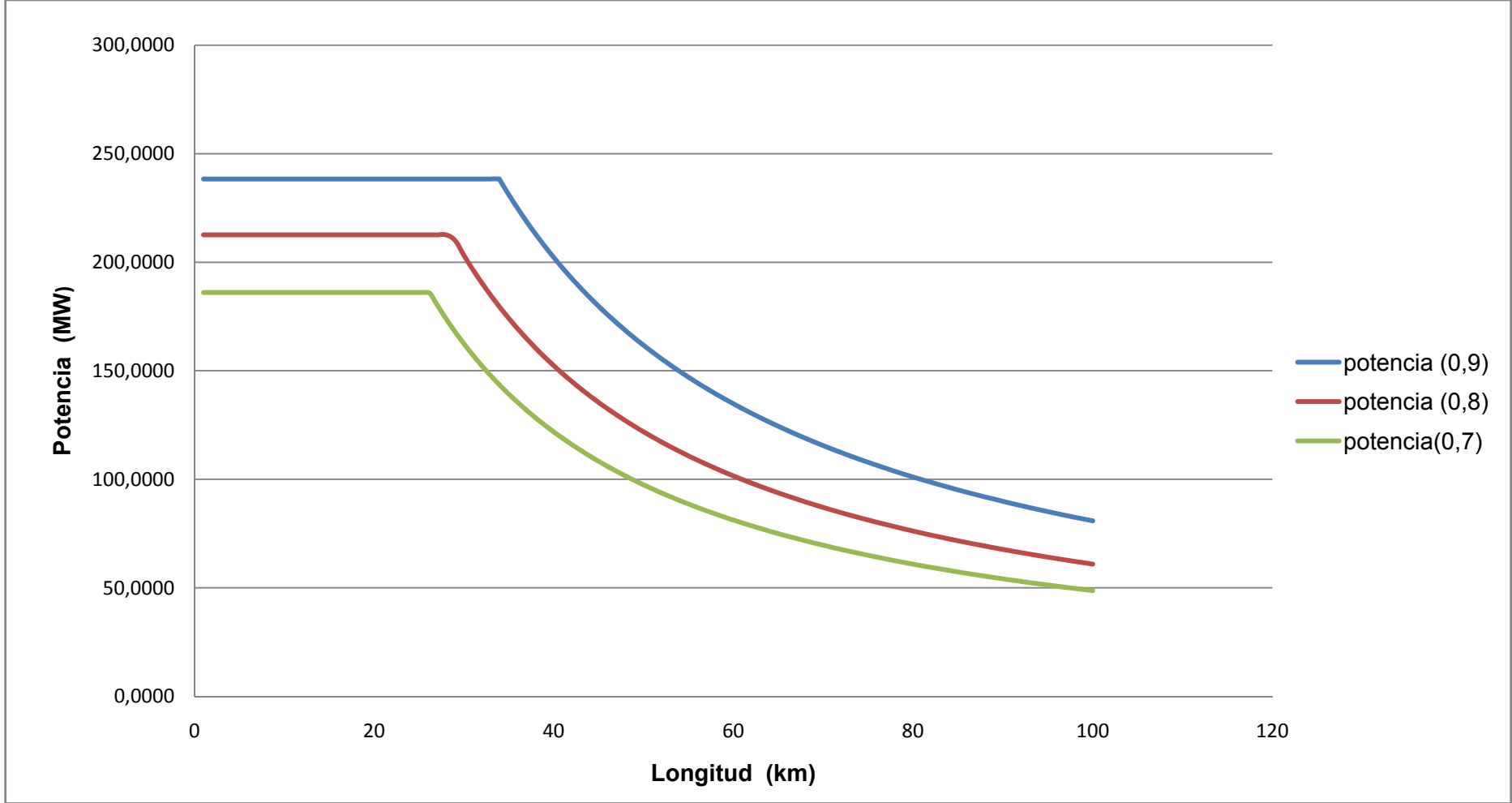
Esta comparación es interesante por la frecuencia con que se presenta en la práctica el caso de tener que ampliar una línea existente con un circuito simple, recurriendo si es posible a dúplex.

A continuación están las gráficas que relacionan la potencia y la longitud de la línea con distintos  $\cos \varphi$  (0,9 0,8 0,7). En ellas se puede observar que la potencia es constante hasta la distancia mínima y que al aumentar la distancia la potencia disminuye.

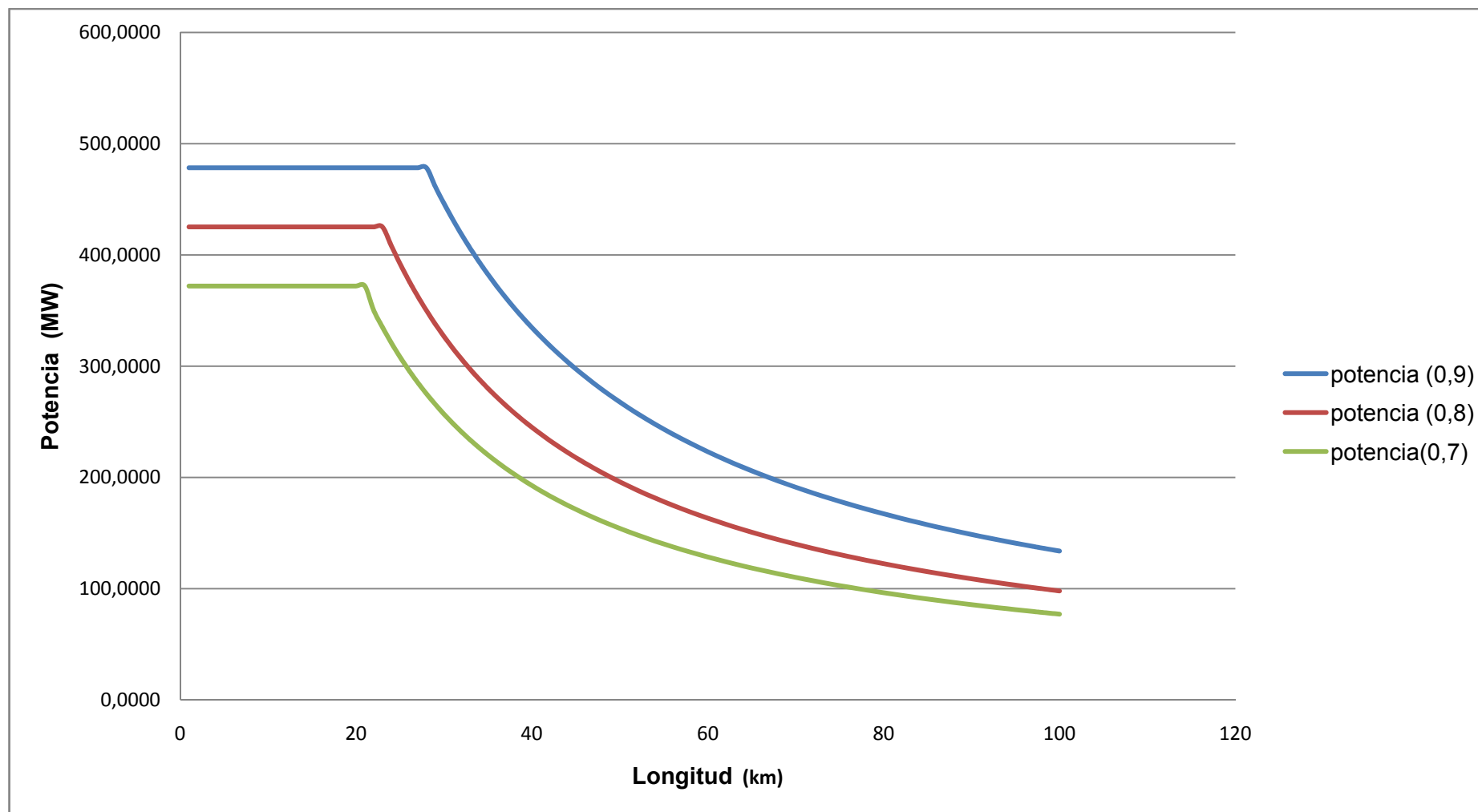
La gráfica que relaciona el momento eléctrico con la caída de tensión, produce una recta lineal ascendente, lo que se concluye que cuanto más larga sea la línea más caída de tensión se produce.

Se observa que la gráfica que relaciona el momento eléctrico con la pérdida de potencia, también es una recta lineal ascendente, que nos lleva a concluir que cuanto más larga sea una línea, más pérdidas se producirán en la línea.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MOMENTO ELÉCTRICO DE LA LÍNEA DOBLE CIRCUITO SIMPLE LA-280

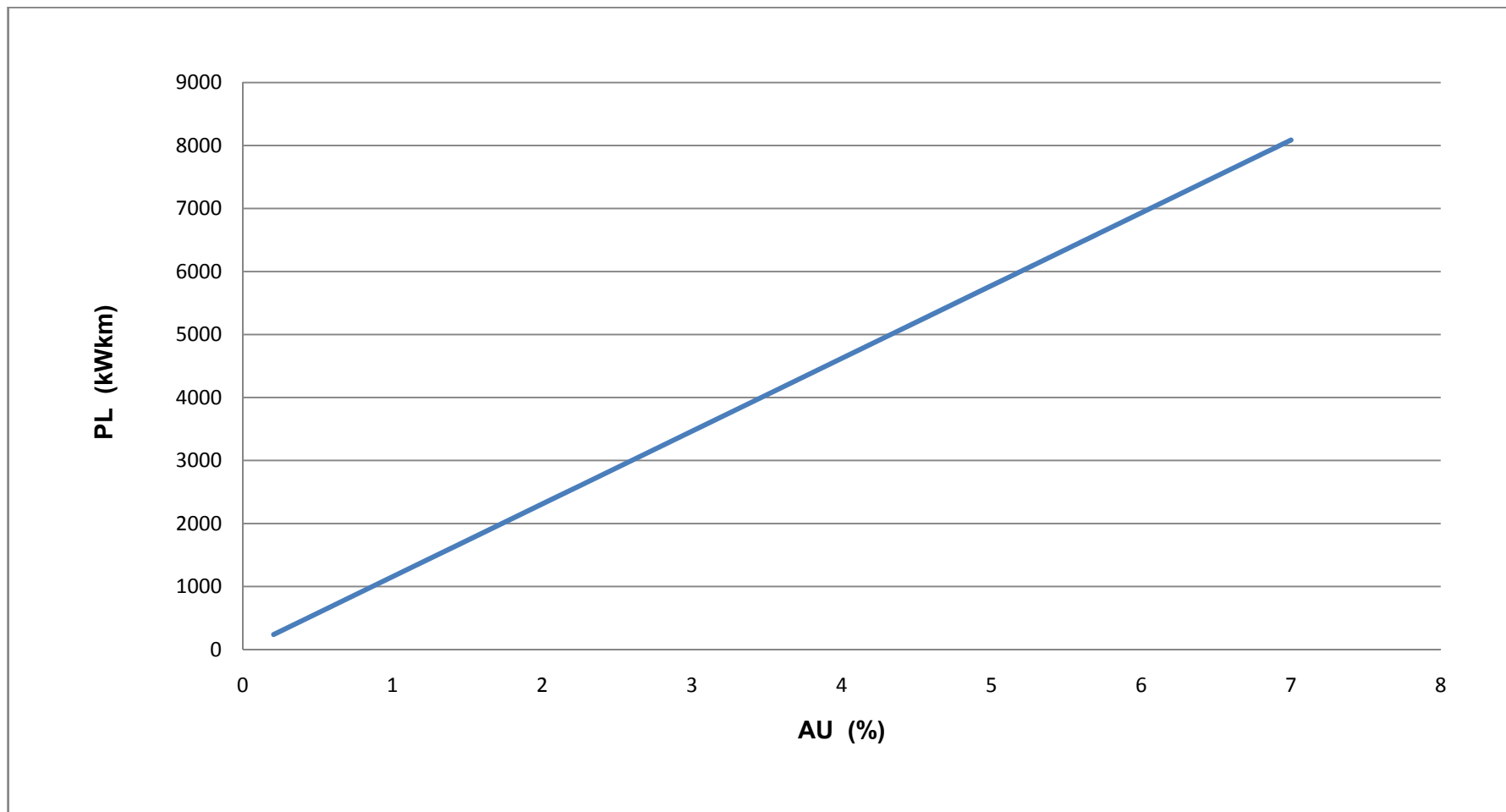


REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MOMENTO ELÉCTRICO DE LA LÍNEA DOBLE CIRCUITO DUPLEX LA-280

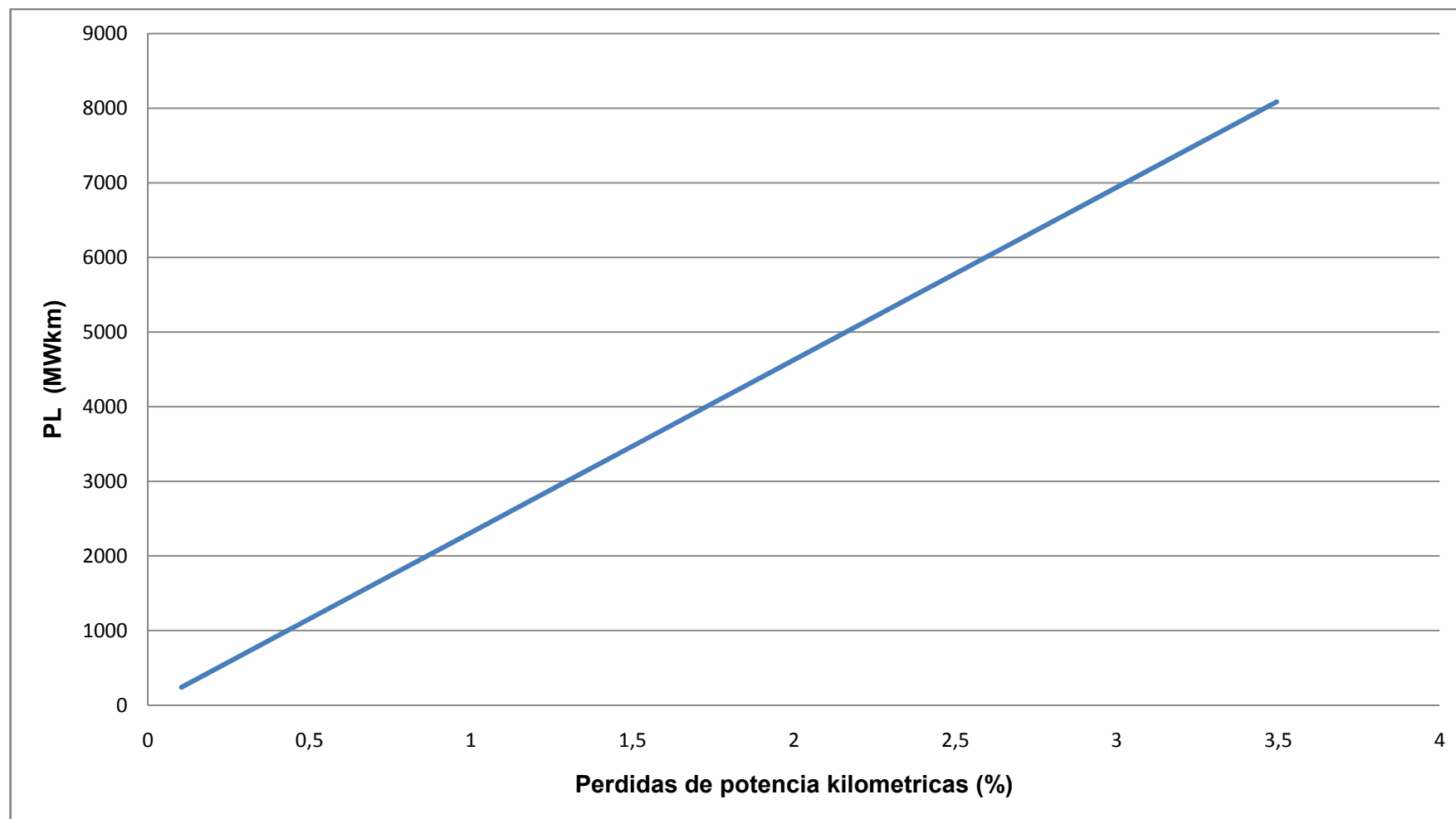




REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MOMENTO ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DE LA CAÍDA DE TENSIÓN DE LA LÍNEA DOBLE CIRCUITO  
SIMPLE LA-280



REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA POTENCIA PÉRDIDA EN % DE LA LÍNEA DOBLE CIRCUITO SIMPLE LA-280



## 7. CÁLCULO MECÁNICO DE CABLES.

Un conductor de peso uniforme, sujeto entre dos apoyos por los puntos A y B situados a la misma altura, forma una curva llamada catenaria. La distancia  $f$  entre el punto más bajo situado en el centro de la curva y la recta AB que une los apoyos, recibe el nombre de flecha. Se llama vano a la distancia ' $a$ ' entre los dos puntos de amarre A y B.

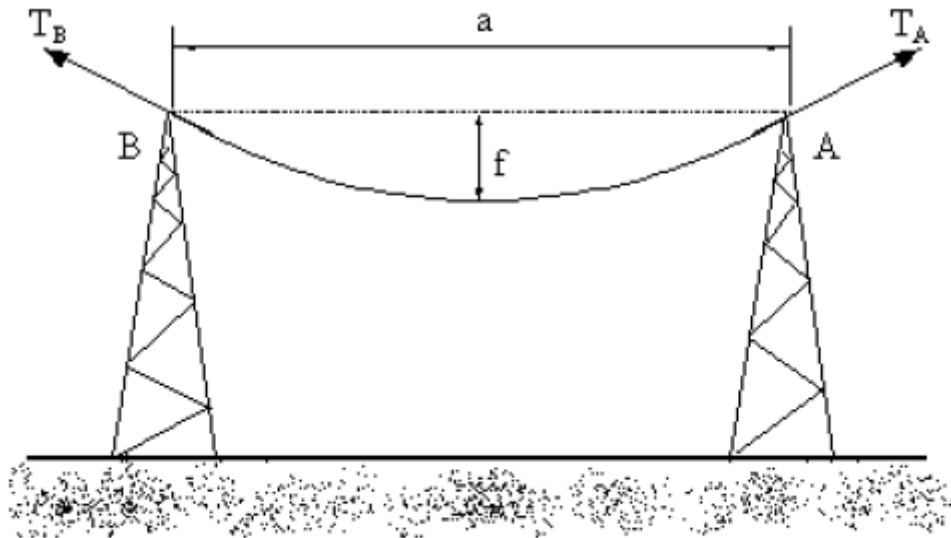


FIGURA 12: CARACTERÍSTICAS DEL VANO.

Los postes deberán soportar las tensiones  $T_A$  y  $T_B$  que ejerce el conductor en los puntos de amarre. La tensión  $T=T_A=T_B$  dependerá de la longitud del vano, del peso del conductor, de la temperatura y de las condiciones atmosféricas.

Para vanos de hasta 500 metros podemos igualar la forma de la catenaria a la de la parábola.

La catenaria deberá emplearse necesariamente en vanos superiores a 500 metros de longitud, ya que cuanto mayor es el vano menor es la similitud entre la catenaria y la parábola.

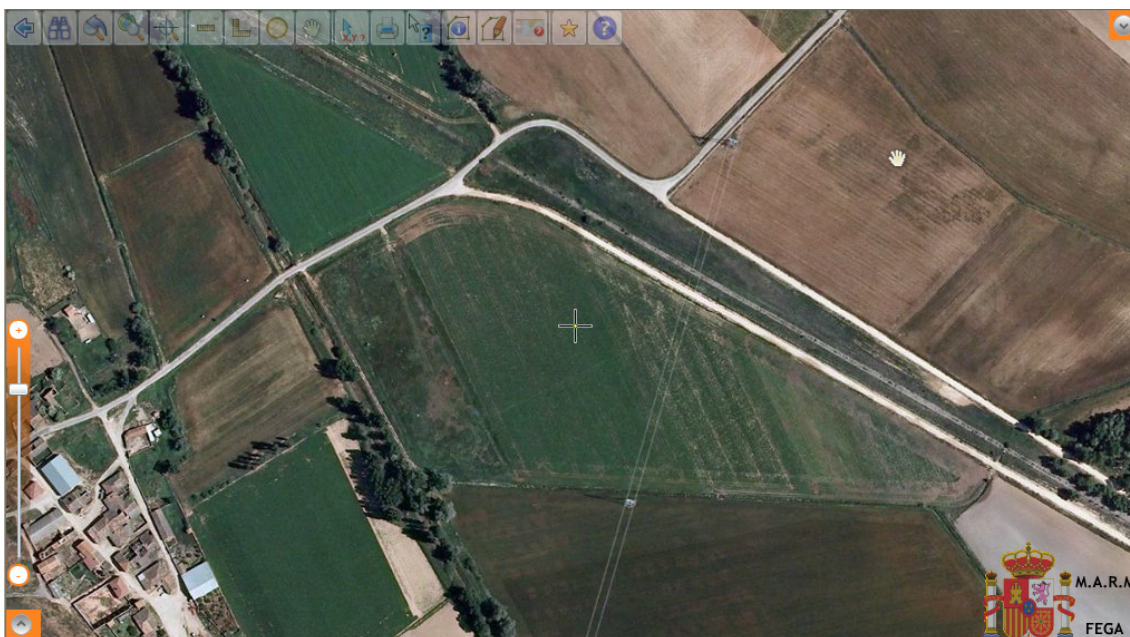


FIGURA 13: VISTA DE UN VANO A SU PASO POR BORDEJÉ.



FIGURA 14: VISTA DE UN TROZO DE LÍNEA.

Hemos medido con bastante aproximación los 162 apoyos con ayuda del visor SIGPAC y hemos realizado la siguiente tabla, así sabremos cual es el vano máximo, el mínimo y el medio de la línea, aproximadamente.

VANO	METROS	OBSERVACIONES
1	259	SET ALMAZAN
2	165	
3	236	
4	121	
5	361	
6	299	
7	287	
8	323	
9	222	
10	332	Cruce CL-116
11	313	
12	300	
13	271	
14	331	
15	273	
16	207	
17	379	
18	317	
19	289	
20	264	
21	228	
22	270	
23	307	

24	290	
25	333	
26	309	
27	297	
28	310	
29	271	
30	311	
31	283	
32	237	
33	186	
34	212	
35	179	
36	236	
37	231	
38	262	
39	254	Cruce C-101
40	329	
41	256	
42	305	
43	376	
44	180	
45	302	
46	275	
47	335	

48	261	
49	398	
50	271	
51	272	
52	251	
53	335	
54	343	
55	250	
56	256	
57	177	
58	316	
59	180	
60	390	Cruza rio Duero
61	191	
62	291	
63	187	
64	276	
65	188	
66	305	
67	233	
68	300	
69	260	
70	246	
71	183	
72	281	
73	319	
74	325	
75	256	
76	324	

77	261		106	313		135	187	
78	326		107	290		136	286	
79	265		108	263		137	246	
80	305		109	282		138	278	
81	197		110	228		139	299	
82	291		111	170		140	284	
83	291		112	235		141	231	
84	308		113	225		142	335	Cruza SO-100
85	246		114	225		143	280	
86	264		115	193		144	221	
87	262		116	215		145	291	
88	255		117	211		146	276	
89	233		118	234		147	343	
90	287		119	317		148	290	
91	165		120	232		149	237	
92	349		121	291		150	355	
93	380		122	140		151	185	
94	307		123	220	Cruza N-111	152	281	
95	195		124	120	Vano mínimo	153	155	
96	254		125	215		154	387	
97	218		126	203		155	186	
98	164		127	297		156	302	
99	337		128	228		157	295	
100	251		129	152		158	335	Cruza rio Golmayo
101	246		130	197		159	254	
102	274		131	278		160	313	
103	273		132	385		161	317	
104	230		133	260		162	281	SET SORIA
105	247		134	275				

Tabla 9: REPRESENTACIÓN DE TODOS LOS VANOS.

Para efectuar el cálculo mecánico de los conductores de las líneas aéreas, es fundamental conocer cuáles son las fuerzas que actúan sobre los mismos. Conocemos que a la carga que constituye el propio peso se suman según los casos el viento o el hielo, de acuerdo con las condiciones climatológicas consideradas en los cálculos.

El Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión, divide el estudio de las acciones sobre los conductores en tres zonas según la altitud.

Nuestra línea pertenece a la zona C, como anteriormente hemos concluido, las distintas hipótesis a cumplir según la elección de la zona son:

ZONA C		
HIPÓTESIS	PESO	T <sup>a</sup> (°C)
TRACCIÓN MÁXIMA	P+H	-20
ADICIONAL	P+V	-15
FLECHA MÁXIMA	P+V	15
	P+H	0
	P	50
T.D.C	P	15
T.H.F	P	-5
FLECHA MÍNIMA	P	-20

TABLA 11: HIPOTESIS EN ZONA C

A continuación hemos hecho el cálculo mecánico para el vano medio, el vano máximo y el vano mínimo para obtener la flecha máxima, la flecha mínima, etc... y comprobar que cumple las condiciones especificadas por el Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión.

## 7.1 CÁLCULO MECANICO PARA EL VANO MEDIO

Las características del vano medio son las siguientes:

a (longitud del vano)=270 m       $\Phi$  (diámetro del conductor) = 21,8 mm

$T_{rotura}$  (Tensión de rotura)=8820kg/f= 86436 N      S (Sección del conductor)= 281,1 mm

p (peso)= 0,975kg/m       $p * g = 9,555 \text{ N/m}$

E (módulo de elasticidad)=7700 kgf/mm<sup>2</sup> = 75,46\*10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>

$\sigma$  (coeficiente de dilatación)=18,90\*10<sup>-6</sup> °C

### A) Tracción máxima admisible:

La tracción máxima de los conductores y cables de tierra no resultará superior a su carga de rotura, dividida por 2,5, si se trata de cables; o dividida por 3 si se trata de alambres; considerándolos sometidos a la hipótesis de sobrecarga siguiente en función de las zonas de sobrecarga definidas en el artículo 17.

Situación inicial del cable donde la tracción tiene que ser menor o igual a un tercio de la tracción de rotura.

$$T_{\max} = \frac{T_{rotura}}{3} = 28\,812 \text{ N} \quad T_1 = 28,812 \text{ kN}$$

Peso propio

$$P = 0,975 \text{ kg/m} * 9,8 \text{ N/kg} = 9,555 \text{ N/m}$$

Sobrecarga hielo:

Al ser zona C la sobrecarga del hielo viene dada por la expresión siguiente:

$$Ph = 0,36 * \sqrt{d} \text{ kg/m} \quad \text{con } d \text{ diámetro del conductor en mm.}$$

$$Ph = 0,36 * \sqrt{21,8} = 1,68 \text{ kg/m} \quad \text{pasándolo a las unidades internacionales:}$$

$$Ph = 1,68 \text{ kg/m} * 9,8 \text{ N/kg} = 16,464 \text{ N/m}$$



En conclusión como el hielo actúa de forma vertical, se suma al peso propio del conductor:

$$m_1 = p + p_h = 26,019 \text{ N/m}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_1 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{270^2 * 26,019 \text{ N/m}}{28812 \text{ N}} = 8,23 \text{ m}$$

### **Ecuación del cambio de estado**

Los conductores de las líneas eléctricas no son hilos sino cables, que no son homogéneos, ya que los que se utilizan, prácticamente en la actualidad, de aluminio-acero, son homogéneos. Los cables de tierra o de protección si son de acero, o sea, homogéneos.

El cálculo mecánico de unos y otros es el mismo, pero el de los heterogéneos hay que hacerlo en función del módulo de elasticidad y del coeficiente de dilatación, correspondientes a la proporción en que se encuentren el aluminio y el acero.

Los valores del modulo y coeficientes citados serán los que facilite como datos el fabricante del cable, en nuestro caso  $E=7700 \text{ kgf/mm}^2$  y  $\sigma=18,90*10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$

En principio, se puede pensar que la única fuerza que actúa sobre el conductor es la fuerza de tensado, pero es necesario tener presente que esta es la consecuencia equilibradora de las demás acciones sobre el mismo, ya que, si el conductor estuviera en el suelo, la tensión para mantenerlo recto sería nula. De esta forma se ve que es el peso de un conductor el que crea la tensión a la que está sometido. Así pues, el primer dato que debe considerarse es su propio peso, pero además existirán acciones importantes debidas a las inclemencias atmosféricas. Por tanto, tanto los conductores como los cables de tierra de las líneas eléctricas aéreas están sometidos a la influencia de:

- Las variaciones de temperatura ambiente.
- La acción del viento.
- La acción de los manguitos de hielo.

Estas magnitudes de origen climatológico actúan sobre los cables modificando la tensión mecánica que se dio a los mismos cuando se hizo su tendido.

La ecuación del cambio de estado tiene por objeto determinar la tensión del tendido de un cable a la temperatura de trabajo, de tal forma que en las condiciones de sobrecarga más desfavorable no sobrepase los límites impuestos por el reglamento.

Siendo esta la ecuación del cambio de estado:

$$T_2^2(T_2+A)=B \quad \left\{ \begin{array}{l} A = \alpha * E * S (\theta_2 - \theta_1) - T_1 + \frac{a^2 * w^2 * E * S}{24 * T_1^2} \\ B = \frac{a^2 * w^2 * E * S}{24} \end{array} \right.$$

$$A|_{\theta_2} = 19 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} * 75,46 * \frac{10^9 \text{ N}}{\text{m}^2} * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2 (\theta_2 + 20^\circ\text{C}) - 28\,812 \text{ N} + \frac{270^2 \text{ m}^2 * 26,019^2 \text{ N}^2 / \text{m}^2 * 75,46 * 10^{-9} \text{ N} / \text{m}^2 * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2}{24 * 28812^2 \text{ N}^2} = 23732,62 \text{ N} + 400,9 * ((\theta_2 + 20^\circ\text{C}))$$

$$B|_{m_2} = \frac{270^2 \text{ m}^2 * 75,46 * 10^9 \text{ N} / \text{m}^2 * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2 * w^2}{24} = 6,443 * 10^{10} * \text{m}^2 \text{ N}^2$$

#### B) Hipótesis adicional

Se considerarán los conductores y cables de tierra sometidos a su propio peso y a una sobrecarga del viento, en nuestra zona a una temperatura de  $-15^\circ\text{C}$ .

Con las hipótesis de tracción máxima y adicional, se obtiene la condición más desfavorable, que posteriormente utilizaremos para elaborar la tabla de tendido del vano. La condición más desfavorable es la que utilizaremos en la ecuación del cambio de condiciones, para obtener el resultado del resto de las hipótesis a calcular.

$$A|_{\theta_2} = 23732,62 + 400,90 * (-15^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = 25737,12 \text{ N}$$

Sobrecarga del viento:

Al tener el conductor de nuestra línea un diámetro mayor de 16 mm, la sobrecarga del viento viene dada por la expresión siguiente:

$$P_v = P \cdot d \quad P: \text{presión del viento en kg/m}^2 \text{ de sección horizontal del cable.}$$

d: diámetro del cable en metros.

$$P = 50 \text{ kg/mm}^2 \cdot 21,80 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,09 \text{ kg/m}$$

El peso propio no cambia.

En conclusión esta acción horizontal del viento sumada a la vertical del propio peso, da lugar al llamado peso aparente del cable:

$m_2 = \sqrt{p^2 + p^2 v} = \sqrt{0,975^2 + 1,09^2} = 1,4624 \text{ kg/m}$  pasándolo a unidades internacionales quedará:

$$m_2 = 1,4624 \text{ kg/m} \cdot 9,8 \text{ N/kg} = 14,33 \text{ N/m}$$

$$A|_{\theta 2} = 25737,12 \text{ N}$$

$$B|_{m2} = 6,443 \cdot 10^{10} \cdot 14,33^2 \text{ N}^2 = 1,323 \cdot 10^{13} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 17\,493,75 \text{ N} < \frac{T_{rot}}{3} \quad \text{cumple la condición.}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_1 = \frac{1}{8} \cdot \frac{a^2 \cdot m_1}{T_1} = \frac{1}{8} \cdot \frac{270^2 \text{ m}^2 \cdot 14,33 \text{ N/m}}{17493,75 \text{ N}} = 7,46 \text{ m}$$

*c) Flechas máximas*

Se determinaran la flecha máxima de los conductores, según la hipótesis de viento, la hipótesis de temperatura y la hipótesis de hielo, además de conocer la altura mínima de los postes de la línea.

*Peso propio + viento  $\theta_2=15^\circ\text{C}$   $m_2=14,33 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2}=23732,62+400,90*(15^\circ\text{C}+20^\circ\text{C})=37739,27 \text{ N}$$

$$B|_{m_2}= 6,443 * 10^{10} * 14,33^2 \text{ N}^2/\text{m}^2 = 1,323 * 10^{13} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2= 15 \text{ 729,97 N} < \frac{T_{rot}}{3} \quad \text{cumple la condición.}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_2=\frac{1}{8} * \frac{a^2*m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{270^2 \text{ m}^2 * 14,33 \text{ N/m}}{15729,97 \text{ N}} = 8,30 \text{ m}$$

*Peso propio + hielo  $\theta_2=0^\circ\text{C}$   $m_2=26,019 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2}=23732,62+400,90*(0^\circ\text{C}+20^\circ\text{C})=31750,62 \text{ N}$$

$$B|_{m_2}= 6,443 * 10^{10} * 26,019^2 \text{ N}^2/\text{m}^2 = 4,36 * 10^{13} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2= 27 \text{ 196,44 N} < \frac{T_{rot}}{3} \quad \text{cumple la condición.}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_2=\frac{1}{8} * \frac{a^2*m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{270^2 \text{ m}^2 * 26,019 \text{ N/m}}{27196,44 \text{ N}} = 8,72 \text{ m}$$

*Peso propio  $\theta_2=50^\circ\text{C}$   $m_1=9,555 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2}=23732,62+400,90*(50^\circ\text{C}+20^\circ\text{C})=51 \text{ 795,62 N}$$

$$B|_{m2} = 6,443 * 10^{10} * 9,555^2 N^2 / m^2 = 5,88 * 10^{12} N^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2 = 9\,772,60\,N < \frac{T_{rot}}{3} \quad \text{cumple la condición}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_2 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{270^2 m^2 * 9,555\,N/m}{9772,60\,N} = 8,91\,m$$

d) Fenómenos vibratorios

*T.C.D (Tensión de cada día) Peso propio  $\theta_2=15^\circ C$   $m_2=9,555\,N/m$*

$$A|_{\theta_2} = 23729,56 + 400,90 * (15^\circ C + 20^\circ C) = 37761,06\,N$$

$$B|_{m2} = 6,443 * 10^{10} * 9,555^2 N^2 / m^2 = 5,88 * 10^{12} N^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2 = 10\,983,15\,N < 0,15 * T_{rotura} \quad \text{Cumple la condición.}$$

$$f_2 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{270^2 m^2 * 9,555\,N/m}{10983,15\,N} = 7,93\,m$$

*T.H.F (Tensión en las horas frías) Peso propio  $\theta_2=-5^\circ C$   $m_2=9,555\,N/m$*

$$A|_{\theta_2} = 23729,56 + 400,90 * (-5^\circ C + 20^\circ C) = 29743,06\,N$$

$$B|_{m2} = 6,443 * 10^{10} * 9,555^2 N^2 / m^2 = 5,88 * 10^{12} N^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2 = 11\,884,91\,N < 0,20 * T_{rotura} \quad \text{Cumple la condición.}$$

$$f_2 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{270^2 m^2 * 9,555\,N/m}{11884,91\,N} = 7,32\,m$$

e) *Tendido*

*Peso propio  $\theta_2=25^\circ\text{C}$   $m_2=9,555 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2}=23732,62+400,90*(25^\circ\text{C}+20^\circ\text{C})=41773,12 \text{ N}$$

$$B|_{m_2}= 6,443 * 10^{10} * 9,555^2 \text{ N}^2/\text{m}^2 = 5,88 * 10^{12} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2= 10\,596,20 \text{ N} < \frac{T_{rot}}{3} \text{ cumple la condición.}$$

$$f_2=\frac{1}{8} * \frac{a^2*m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{270^2\text{m}^2*9,555 \text{ N/m}}{10596,20 \text{ N}} = 8,22 \text{ m}$$

## 7.1 CALCULO MECANICO PARA EL VANO MÁXIMO

Las características del vano máximo son las mismas que para el vano medio, tan solo cambia el valor del vano, en este caso,  $a= 390 \text{ m}$ :

A) *Tracción máxima admisible:*

Situación inicial del cable donde la tracción tiene que ser menor o igual a un tercio de la tracción de rotura.

$$T_{\max} = \frac{T_{rotura}}{3} = 28\,812 \text{ N} \quad T_1 = 28\,812 \text{ N}$$

*Peso propio + hielo  $\theta_1=-20^\circ\text{C}$   $m_1=26,019 \text{ N/m}$*

Ecuación de la flecha:

$$f_1=\frac{1}{8} * \frac{a^2*m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{390^2*26,019 \text{ N/m}}{28812 \text{ N}} = 17,17 \text{ m}$$

Ecuación del cambio de estado:

$$A|_{\theta_2} = 19 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} * 75,46 * \frac{10^9 \text{ N}}{\text{m}^2} * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2 (\theta_2 + 20^\circ\text{C}) - 28\,812 \text{ N} +$$

$$\frac{390^2 \text{ m}^2 * 26,019^2 \text{ N}^2 / \text{m}^2 * 75,46 * 10^9 \text{ N} / \text{m}^2 * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2}{24 * 28812^2 \text{ N}^2} = -28650,06 \text{ N} + 400,9 * ((\theta_2 + 20^\circ\text{C}))$$

$$B|_{m_2} = \frac{390^2 \text{ m}^2 * 75,46 * 10^9 \text{ N} / \text{m}^2 * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2 * w^2}{24} = 1,344 * 10^{11} * \text{m}^2 \text{ N}^2$$

$$A|_{\theta_2} = 80818,15 + 400,90 * (\theta_2 + 20^\circ\text{C})$$

$$B|_{m_2} = 1,344 * 10^{11} * \text{m}^2 \text{ N}^2$$

*B) Hipótesis adicional*

Se considerarán los conductores y cables de tierra sometidos a su propio peso y a una sobrecarga del viento, en nuestra zona a una temperatura de  $-15^\circ\text{C}$ .

Propio peso + viento  $\theta_1 = -15^\circ\text{C}$   $m_1 = 14,33 \text{ N/m}$

$$A|_{\theta_2} = 80811,89 + 400,90 * (-15^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = 82816,39 \text{ N}$$

$$B|_{m_2} = 1,344 * 10^{11} * \text{m}^2 \text{ N}^2 = 2,76 * 10^{13} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 16\,657,15 \text{ N} < \frac{T_{rot}}{3} \quad \text{cumple la condición.}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_1 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{390^2 * 14,33 \text{ N/m}}{16657,15 \text{ N}} = 16,36 \text{ m}$$

*c) Flechas máximas*

Se determinarán la flecha máxima de los conductores, además de conocer la altura mínima de los postes de la línea.

Peso propio + viento  $\theta_2 = 15^\circ\text{C}$   $m_2 = 14,33 \text{ N/m}$

$$A|_{\theta_2} = 80811,89 + 400,90 * (15^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = 94843,39 \text{ N}$$

$$B|_{m2} = 1,344 * 10^{11} * m^2 N^2 = 2,76 * 10^{13} N^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2 = 15\,794,39\,N < \frac{T_{rot}}{3} \quad \text{cumple la condición.}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_1 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{390^2 * 14,33\,N/m}{15794,39\,N} = 17,25\,m$$

*Peso propio + hielo  $\theta_2=0^\circ C$   $m_2=26,019\,N/m$*

$$A|_{\theta_2} = 80811,89 + 400,90 * (0^\circ C + 20^\circ C) = 88829,89\,N$$

$$B|_{m2} = 1,344 * 10^{11} * m^2 N^2 = 9,1 * 10^{13} N^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2 = 27\,918,68\,N < \frac{T_{rot}}{3} \quad \text{cumple la condición.}$$

$$f_1 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{390^2 * 26,019\,N/m}{27918,68\,N} = 17,72\,m$$

*Peso propio  $\theta_2=50^\circ C$   $m_2=9,555\,N/m$*

$$A|_{\theta_2} = 80811,89 + 400,90 * (50^\circ C + 20^\circ C) = 108874,89\,N$$

$$B|_{m2} = 1,344 * 10^{11} * m^2 N^2 = 1,227 * 10^{13} N^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2 = 10\,153,08\,N < \frac{T_{rot}}{3} \quad \text{cumple la condición.}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_1 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{390^2 * 9,555\,N/m}{10153,08\,N} = 17,89\,m$$



d) Fenómenos vibratorios

*T.C.D (Tensión de cada día) Peso propio  $\theta_2=15^\circ\text{C}$   $m_2=9,555 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2}=80811,89+400,90*(15^\circ\text{C}+20^\circ\text{C})=94843,39 \text{ N}$$

$$B|_{m_2}= 1,344 * 10^{11} * m^2 N^2= 1,227*10^{13} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2= 10 \text{ 779,51 N} < 0,15*T_{\text{rotura}} \text{ cumple la condición}$$

$$f_1=\frac{1}{8} * \frac{a^2*m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{390^2*9,555 \text{ N/m}}{10779,51\text{N}} = 16,85 \text{ m}$$

*T.H.F (Tensión en las horas frías) Peso propio  $\theta_2=-5^\circ\text{C}$   $m_2=9,555 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2}=80811,89+400,90*(-5^\circ\text{C}+20^\circ\text{C})=86825,39 \text{ N}$$

$$B|_{m_2}= 1,344 * 10^{11} * m^2 N^2= 1,227*10^{13} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$T_2= 11 \text{ 190 N} < 0,20*T_{\text{rotura}} \text{ Cumple la condición.}$$

$$f_1=\frac{1}{8} * \frac{a^2*m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{390^2*9,555 \text{ N/m}}{11190\text{N}} = 16,23 \text{ m}$$

e) Tendido

*Peso propio  $\theta_2=25^\circ\text{C}$   $m_2=9,555 \text{ N/m}$*

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2+A)=B$

$$A|_{\theta_2}=80811,89+400,90*(25^\circ\text{C}+20^\circ\text{C})=98852,39 \text{ N}$$

$$B|_{m_2}= 1,344 * 10^{11} * m^2 N^2= 1,227*10^{13} \text{ N}^3$$

$$T_2= 10 \text{ 588,45 N} < \frac{T_{\text{rot}}}{3}$$

$$f_2 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{270^2 \text{ m}^2 * 9,555 \text{ N/m}}{10588,45 \text{ N}} = 8,22 \text{ m}$$

## 7.1 CALCULO MECANICO PARA EL VANO MÍNIMO

Las características del vano máximo son las mismas que para el vano medio y máximo, tan solo cambia el valor del vano, en este caso,  $a = 120 \text{ m}$ :

A) *Tracción máxima admisible:*

Situación inicial del cable donde la tracción tiene que ser menor o igual a un tercio de la tracción de rotura.

$$T_{\max} = \frac{T_{\text{rotura}}}{3} = 28\,812 \text{ N} \quad T_1 = 28,812 \text{ KN}$$

$$A|_{\theta_2} = -18434 + 400,90 * (\theta_2 + 20 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$B|_{m_2} = K * m_2^2 = 1,16195 * 10^{12} \text{ N}^3 * m_2^2$$

*Peso propio + hielo  $\theta_1 = -20^\circ\text{C}$   $m_1 = 26,019 \text{ N/m}$*

Ecuación de la flecha:

$$f_1 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{120^2 * 26,019 \text{ N/m}}{28812 \text{ N}} = 1,63 \text{ m}$$

Ecuación del cambio de estado:

$$A|_{\theta_2} = 19 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} * 75,46 * \frac{10^9 \text{ N}}{\text{m}^2} * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2 (\theta_2 + 20^\circ\text{C}) - 28\,812 \text{ N} + \frac{120^2 \text{ m}^2 * 26,019^2 \text{ N}^2 / \text{m}^2 * 75,46 * 10^9 \text{ N} / \text{m}^2 * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2}{24 * 28812^2 \text{ N}^2} = -18432,8 \text{ N} + 400,9 * ((\theta_2 + 20 \text{ } ^\circ\text{C}))$$

$$B|_{m_2} = \frac{120^2 \text{ m}^2 * 75,46 * 10^9 \text{ N} / \text{m}^2 * 281,1 * 10^{-6} \text{ m}^2 * w^2}{24} = 1,27 * 10^{10} * m_2^2 \text{ N}^2$$

$$A|_{\theta_2} = -18432,8 + 400,90 * (\theta_2 + 20 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$B|_{m_2} = 1,27 * 10^{10} * m_2^2 \text{ N}^2$$

*Hipótesis adicional*

Se considerarán los conductores y cables de tierra sometidos a su propio peso y a una sobrecarga del viento, en nuestra zona a una temperatura de -15 °C.

*Peso propio + viento  $\theta_1 = -15^\circ\text{C}$   $m_1 = 14,33 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2} = -18432,8 + 400,90 \cdot (-15^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = -16428,3 \text{ N}$$

$$B|_{m_2} = 1,27 \cdot 10^{10} \cdot \text{m}^2 \cdot 2 \text{ N}^2 = 2,61 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 21\,880,12 \text{ N} < \frac{T_{rot}}{3}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_1 = \frac{1}{8} \cdot \frac{a^2 \cdot m_1}{T_1} = \frac{1}{8} \cdot \frac{120^2 \cdot 14,33 \text{ N/m}}{21880,12 \text{ N}} = 1,18 \text{ m}$$

*c) Flechas máximas*

Se determinarán la flecha máxima de los conductores, además de conocer la altura mínima de los postes de la línea.

*Peso propio + viento  $\theta_2 = 15^\circ\text{C}$   $m_2 = 14,33 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2} = -18434 + 400,90 \cdot (15^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = -4402,5 \text{ N}$$

$$B|_{m_2} = 1,27 \cdot 10^{10} \cdot \text{m}^2 \cdot 2 \text{ N}^2 = 2,61 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 15\,403,18 \text{ N} < \frac{T_{rot}}{3}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_1 = \frac{1}{8} \cdot \frac{a^2 \cdot m_1}{T_1} = \frac{1}{8} \cdot \frac{120^2 \cdot 14,33 \text{ N/m}}{15403,18 \text{ N}} = 1,67 \text{ m}$$

*Peso propio + hielo  $\theta_2=0^\circ\text{C}$   $m_2=26,019 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2} = -18434 + 400,90 \cdot (0^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = -10416 \text{ N}$$

$$B|_{m_2} = 1,27 \cdot 10^{10} \cdot m_2^2 \text{ N}^2 = 8,6 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 24\,612,58 \text{ N} < \frac{T_{rot}}{3}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_2 = \frac{1}{8} \cdot \frac{a^2 \cdot m_1}{T_1} = \frac{1}{8} \cdot \frac{120^2 \cdot 26,019 \text{ N/m}}{24612,58 \text{ N}} = 1,9 \text{ m}$$

*Peso propio  $\theta_2=50^\circ\text{C}$   $m_2=9,555 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2} = -18434 + 400,90 \cdot (50^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = 9629 \text{ N}$$

$$B|_{m_2} = 1,27 \cdot 10^{10} \cdot m_2^2 \text{ N}^2 = 1,16 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 8\,090,93 \text{ N} < \frac{T_{rot}}{3}$$

Ecuación de la flecha:

$$f_2 = \frac{1}{8} \cdot \frac{a^2 \cdot m_1}{T_1} = \frac{1}{8} \cdot \frac{120^2 \cdot 9,555 \text{ N/m}}{8090,93 \text{ N}} = 2,12 \text{ m}$$

*d) Fenómenos vibratorios*

*T.C.D (Tensión de cada día) Peso propio  $\theta_2=15^\circ\text{C}$   $m_2=9,555 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2} = -18434 + 400,90 \cdot (15^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = -4402,5 \text{ N}$$

$$B|_{m_2} = K \cdot m_2^2 = 1,16195 \cdot 10^{12} \text{ N}^3 \cdot 9,555 \text{ N}^2 = 1,16195 \cdot 10^{12} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 12\,204 \text{ N} < 0,15 \cdot T_{rotura} \text{ Cumple la condición.}$$

$$f_2 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{120^2 * 9,555 \text{ N/m}}{12204 \text{ N}} = 1,41 \text{ m}$$

*T.H.F (Tensión en las horas frías) Peso propio  $\theta_2 = -5^\circ\text{C}$   $m_2 = 9,555 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2} = -18434 + 400,90 * (-5^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = -12420, \text{N}$$

$$B|_{m_2} = K * m_2^2 = 1,16195 * 10^{12} \text{ N}^3 * 9,555 \text{ N}^2 = 1,16195 * 10^{12} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 16 \text{ 624,67 N} < 0,20 * T_{\text{rotura}} \text{ Cumple la condición.}$$

$$f_2 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{120^2 * 9,555 \text{ N/m}}{16624,67 \text{ N}} = 1,03 \text{ m}$$

*e) Tendido*

*Peso propio  $\theta_2 = 25^\circ\text{C}$   $m_2 = 9,555 \text{ N/m}$*

$$A|_{\theta_2} = -18434 + 400,90 * (25^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C}) = -393,5 \text{ N}$$

$$B|_{m_2} = K * m_2^2 = 1,16195 * 10^{12} \text{ N}^3 * 9,555 \text{ N}^2 = 1,11 * 10^{13} \text{ N}^3$$

Ecuación de cambio de estado:  $T_2^2(T_2 + A) = B$

$$T_2 = 22 \text{ 438,93 N} < \frac{T_{\text{rot}}}{3}$$

$$f_2 = \frac{1}{8} * \frac{a^2 * m_1}{T_1} = \frac{1}{8} * \frac{120^2 * 9,555 \text{ N/m}}{22438,93 \text{ N}} = 0,76 \text{ m}$$

Aunque no hace falta colocar antivibradores, ya que las tensiones no exceden de lo permitido, en ningún caso, si que es recomendable como medio de protección colocar amortiguadores de tirante y grapas de suspensión armada como en la figura 9.

#### 7.4 RESUMEN DE LAS MAGNITUDES CALCULADAS.

Todos los datos obtenidos de las tensiones, coeficientes de seguridad y flechas quedan reflejados en las tablas siguientes:

CÁLCULO MECÁNICO DEL CONDUCTOR HALCÓN ZONA C Long. Vano=270 m				
Hipótesis de cálculo	Tensiones en N.	Coef. de seguridad	Flechas en metros	Observaciones
Hielo, -20 °C	28 812	3	8,23	
Viento, 15 °C	15 729,97	5,49	8,30	
Hielo, 0 °C	27 196,44	3,17	8,72	
Sin sobrecarga, 50°C	9 772,60	8,84	8,91	
Viento, -15 °C	17 493,75	4,94	7,46	Hipótesis adicional
Sin sobrecarga, 15°C	10 983,15	7,86	7,93	TDC ( 12,71% )
Sin sobrecarga, -5°C	11 884,91	7,27	7,32	THF ( 13,75% )
Sin sobrecarga, 25°C	10 596,20	8,15	8,22	Tendido

TABLA 11: CALCULO MECANICO DEL VANO MEDIO.

CÁLCULO MECÁNICO DEL CONDUCTOR HALCÓN ZONA C Long. Vano máx =390 m				
Hipótesis de cálculo	Tensiones en N.	Coef. de seguridad	Flechas en metros	Observaciones
Hielo, -20 °C	28 812	3	17,17	
Viento, 15 °C	15 794,39	5,47	17,25	
Hielo, 0 °C	27 918,68	3,09	17,72	
Sin sobrecarga, 50°C	10 153,08	8,51	17,89	Flecha máxima
Viento, -15 °C	16 657,15	5,19	16,36	Hipotesis adicional
Sin sobrecarga, 15°C	10 779,51	8,02	16,85	TDC (12,47% )
Sin sobrecarga, -5°C	11 190	7,72	16,23	THF ( 12,94% )
Sin sobrecarga, 25°C	10 588,45	8,16	8,22	Tendido

TABLA 12: CALCULO MECANICO DEL VANO MAXIMO.

CÁLCULO MECÁNICO DEL CONDUCTOR HALCÓN ZONA C Long. Vano min =120 m				
Hipótesis de cálculo	Tensiones en N.	Coef. de seguridad	Flechas en metros	Observaciones
Hielo, -20 °C	28 812	3	1,63	
Viento, 15 °C	15 403,18	5,61	1,67	
Hielo, 0 °C	24 612,58	3,51	1,9	
Sin sobrecarga, 50°C	8 090,93	10,67	2,12	
Viento, -15 °C	21 880,12	3,95	1,18	Hipótesis adicional
Sin sobrecarga, 15°C	12 204,00	7,08	1,41	TDC ( 14,12% )
Sin sobrecarga, -5°C	16.624,67	5,2	1,03	THF ( 19,23% )
Sin sobrecarga, 25°C	22 438,93	3,85	0,76	Tendido (Flecha mínima)

TABLA 13: CALCULO MECANICO DEL VANO MINIMO

Observamos que no hay ninguna tensión mayor que la tensión de rotura, y los coeficientes son todos mayores de 3, según explica el Reglamento que tiene que ser, concluimos que el calculo mecánico ha sido realizado con éxito.

La flecha mínima nos ha salido muy pequeña, de valor 0,76 m, y la máxima de 17,89 m, hay demasiada diferencia entre una y otra.

## 8. DISTANCIAS MINIMAS DE SEGURIDAD.

### 8.1 DISTANCIA DE LOS CONDUCTORES AL TERRENO

De acuerdo con el apartado 25.1 del Reglamento, la distancia de los conductores al terreno deberá ser superior a:

$$D1 = 5,3 + \frac{U}{150}$$

Entonces obtenemos una distancia de:

$$D_T = 6,18 \text{ m}$$

$D_T$ : Distancia del conductor inferior al terreno, en metros.

$U$ : Tensión nominal de la línea (kV)

La distancia tiene que ser como mínimo 6 metros, en nuestro caso se cumple.

### 8.2 DISTANCIA ENTRE CONDUCTORES

La distancia mínima de los conductores entre si viene marcada por el artículo 25.2 del antiguo reglamento, esto es:

$$Dc = k\sqrt{F_{max} + L_{cadenas}} + \frac{U}{150}$$

$Dc$ : Distancia entre conductores.

$K$ : Coeficiente que depende de la oscilación de los conductores con el viento ( $\alpha$ ) y de la tensión nominal de la línea.

$F_{max}$ : Flecha máxima de cada apoyo (m).

$L_{cadena}$ : Longitud en metros de la cadena de suspensión.

Los datos son los siguientes:

$$L_{cadena} = 1\,390 \text{ m}$$

$$F_{max} = 17,890 \text{ m}$$

Para saber el valor del coeficiente  $K$  hay que calcular el ángulo de oscilación y ver que valor de  $k$  le corresponde.

$$\tan \varphi = \frac{\text{Sobrecarga viento}}{\text{Sobrecarga peso+hielo}} \quad \varphi = 28,63^\circ < 40^\circ$$

El valor que le corresponde a  $k$  según la tabla 12 es de 0,6.



Angulo de oscilacion	Valores de K	
	Lineas de 1ª y 2ª categoría	Lineas de 3ª categoría
Superior a 65 °	0,7	0,65
Entre 40 ° y 65 °	0,65	0,6
Inferior a 40 °	0,6	0,55

Tabla 12: Valor del coeficiente K.

Según los cálculos realizados:

$$Dc = 3,73 \text{ m}$$



FIGURA 15: DETALLE DE LAS DISTANCIAS ENTRE CONDUCTORES

### 8.3 DISTANCIA A TIERRA.

Según el artículo 25.2 del antiguo Reglamento, la separación mínima entre los conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos no será inferior a:

$$D_m = 0,1 + \frac{U}{150}$$

$D_m$  = distancia entre conductores y partes metálicas.

En nuestro caso:

$$D_m = 0,98 \text{ metros}$$

Esta distancia tiene que ser mayor de 0,2, en nuestro caso cumple.



FIGURA 17: DETALLE DE LA DISTANCIA MINIMA EN CARRETERA

## 9. GLOSARIO

Para la mayoría de estos términos las definiciones corresponden a las establecidas en la norma UNE 21302.

**Aislamiento de un cable:** Conjunto de materiales que forman parte de un cable y cuya función específica es soportar la tensión.

**Alta tensión:** Se considera alta tensión, toda tensión nominal superior a 1 KV.

**Cable o cable aislado:** Conjunto constituido por:

- Uno o varios conductores aislados.
- Su eventual revestimiento individual.
- La eventual protección del conjunto.
- El o los eventuales revestimientos de protección que se dispongan.

**Cable de tierra:** Conductor conectado a tierra en alguno o en todos los apoyos, dispuesto generalmente, aunque no necesariamente, por encima de los conductores de fase, con el fin de asegurar una determinada protección frente a las descargas atmosféricas.

**Cable de tierra de fibra óptica:** Cable de tierra que contiene fibras ópticas para telecomunicación. El componente conductor puede ser cableado, tubular o una combinación entre ambos.

**Cantón de una línea:** Conjunto de vanos de una línea eléctrica comprendidos entre dos apoyos de amarre.

**Corriente de cortocircuito máxima admisible:** Valor de la corriente de cortocircuito que puede soportar un elemento de la red, durante una corta duración especificada.

**Corriente de defecto o de falta:** Corriente que circula debido a un defecto de aislamiento.

**Corriente de defecto a tierra:** Es la corriente que en el caso de un solo punto de defecto a tierra, se deriva por el citado punto desde el circuito averiado a tierra o a partes conectadas a tierra.

**Defecto a tierra:** Defecto de aislamiento entre un conductor y tierra.

**Empalme:** Accesorio que garantiza la conexión entre dos cables para formar un circuito continuo.

**Nivel de aislamiento:** Para un aparato o material eléctrico determinado, característica definida por un conjunto de tensiones especificadas de su aislamiento.

- a) Para materiales cuya tensión más elevada para el material sea menor que 300 KV, el nivel de aislamiento está definido por las tensiones soportadas nominales a los impulsos tipo rayo y las tensiones soportadas nominales a frecuencia industrial de corta duración.
- b) Para materiales cuya tensión más elevada para el material sea igual o mayor que 300 KV, el nivel de aislamiento está definido por las tensiones soportadas nominales a los impulsos de tipo maniobra y rayo.

**Red de distribución:** Conjunto de conductores con todos sus accesorios, sus elementos de sujeción, protección etc., que une una fuente de energía o una fuente de alimentación de energía con las instalaciones interiores o receptoras.

**Redes de distribución de compañía:** Son las redes de distribución propiedad de una empresa distribuidora de energía eléctrica.

**Tensión más elevada para el material (  $U_m$  ):** La mayor tensión eficaz entre fases para la cual se define el material, en lo que se refiere al aislamiento y determinadas características que están eventualmente relacionadas con esta tensión, en las normas propuestas para cada material.

**Tensión nominal:** Valor convencional de la tensión con la que se denomina un sistema o instalación y para el que ha sido previsto su funcionamiento y aislamiento.

**Tensión soportada nominal a frecuencia industrial:** Es el valor eficaz de una tensión alterna sinusoidal a frecuencia industrial; que el material considerado debe de ser capaz de soportar sin perforación ni contorneamiento durante los ensayos realizados en las condiciones especificadas.

**Tensión soportada nominal a los impulsos tipo maniobra o tipo rayo:** Es el valor de cresta de tensión soportada a los impulsos tipo maniobra o tipo rayo prescrita para

un material, el cual caracteriza el aislamiento de este material en lo relativo a los ensayos de tensión soportada.

**Vano de una línea:** Distancia entre dos apoyos consecutivos de una línea eléctrica.

## 10. BIBLIOGRAFIA

1. Checa Luis María

Líneas de transporte de energía

Editorial marcombo, 3ª edición.

2. Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión

Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero de 2008

Editorial PARANINFO.

3. Tora Galván Jose Luis

Transporte de la energía eléctrica: líneas aéreas a M.A.T y C.A

Publicaciones de la Universidad Pontificia Comillas. Colección Ingeniería; 11.

4. Catálogo IMEDEXSA

5. Página web del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino

S.I.G.P.A.C. (Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas)

<http://www.sigpac.es>

6. Pagina web de Iberdrola

<http://www.iberdrola.es>

7. B.O.C y L (Boletín Oficial de Castilla y León)

Miércoles, 17 de abril de 2002 B.O.C. y L. n.º 73.